

## Изменение полей влагосодержания и температуры в зерне при сушке

**Сорочинский Владимир Федорович**

*ВНИИЗ – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН*

*Адрес: 127434, город Москва, Дмитровское шоссе, 11*

*E-mail: vlafest@bk.ru*

**Догадин Алексей Львович**

*ВНИИЗ – филиал ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН*

*Адрес: 127434, город Москва, Дмитровское шоссе, 11*

*E-mail: dogadin1@inbox.ru*

Для проведения экспериментальных исследований по изменению полей влагосодержания и температуры в зерновке в процессе сушки и отволаживания разработана экспериментальная установка и методика проведения опытов. Исследования проведены на модельном теле зерновки нута. Установлено, что в зависимости от режимных параметров различия по влажности между центром и поверхностью зерновки могут достигать до 10%. При этом, максимальное значение перепада температур при сушке между центром и поверхностью зерновки соответствует переходу от постоянной скорости сушки к убывающей скорости сушки и увеличивается с ростом начальной влажности зерновки, температуры и скорости фильтрации агента сушки. Получены уравнения регрессии для расчета максимального значения этой величины, а также максимального значения градиента влагосодержания в зерне и времени достижения этого значения. Установлено также, что в процессе отволаживания нагретого зерна при температуре 45 градусов, характерной для отлежки, происходит перераспределение влаги между центром и поверхностью зерна, при этом, влага из центра перемещается к поверхности, что способствует в дальнейшем более экономичному процессу сушки. Эффективность этого процесса зависит от влажности зерновки и продолжительности отволаживания. Различие между центром и поверхностью зерновки при влажности 17,3 – 27,5% снижается в этом процессе за 40 минут соответственно в 1,3 – 2,0 раз, и за 60 минут – в 1,4-2,7 раз. Получено расчетное уравнение для определения этого значения в зависимости от начальной влажности зерновки и продолжительности отволаживания. Расчетные уравнения использованы для определения разницы температур между температурой агента сушки и центра зерновки в процессе сушки, а также для определения максимального градиента температуры в зерне и времени этого достижения. Знание этих зависимостей необходимо для разработки режимов сушки зерна и сохранение его качества.

**Ключевые слова:** зерно, агент сушки, нагрев, поля влагосодержания и температуры, градиент, уравнения регрессии, теплообмен

Важным показателем, характеризующим кинетику и динамику процесса сушки, влияние различных параметров на эффективность внутреннего и внешнего теплообмена является изменение полей температуры и влагосодержания в единичной зерновке. Известно, что наиболее эффективными являются режимы сушки зерна, при которых поток удаляемой влаги в жидком состоянии направлен изнутри зерновки к поверхности, на которой располагается зона ее испарения. Эти режимы зависят от влажности и температуры нагрева зерна, температуры, относительной влажности и скорости фильтрации агента сушки, а также состояния слоя зерна.

Установлено, что для мелких частиц сыпучего

материала, имеющих хорошую теплопроводность, выравнивание температурного поля для сухой частицы в процессе нагрева или охлаждения происходит за секунды (Аэров, Тодес, 1968). В этом случае скорость нагрева или охлаждения определяется теплопередачей от поверхности частицы. Вместе с тем, для влажной, даже очень мелкой частицы, перепад температуры между ее центром и поверхностью в процессе нагрева или охлаждения может быть значительным, так как он создается за счет испарения влаги (Лыков, 1968). Одновременно в частице создается также перепад по влажности между центром и поверхностью. Изучение полей температуры и влагосодержания особенно важно при сушке зерновых культур, зерновки которых имеют относительно крупные

размеры и низкую тепло – и массопроводность (Гинзбург, Громов, Красовская, Уколов, 1975).

Важной характеристикой полей температуры и влагосодержания являются их значения в центре и на поверхности зерновки, по которым можно оценить распределение температуры и влажности по толщине зерновки и определить градиенты температуры и влагосодержания. Проведенными ранее немногочисленными исследованиями температуры центра и поверхности зерновки в процессе ее нагрева агентом сушки температурой 1100С установлен максимально измеренный перепад 140С, при этом выравнивание температур происходило уже через 5-20 секунд (Тарутин, 1974). Однако, при активном вентилировании зерна атмосферным воздухом значение перепада температур не превышало 0,2-0,50С (Грачева, Руденко, 2014).

Для исследования распределения влаги в зерновке использовались в основном косвенные методы, основанные на определении границы перемещающейся, помеченной тем или иным способом жидкости при увлажнении зерновки (Перцовский, 1961; Меленевская, 1968; Сахаров, Егоров, Коротков, Шубин, 1971). При этом полученные данные в достаточной степени не отражают реальное распределение влагосодержания, однако не связаны ни с сушкой, ни с охлаждением зерновки, а также с режимными параметрами процесса, и носят в основном иллюстративный характер. Отдельный опыт по определению полей влагосодержания проведен при сушке на модельном теле зерновки нута (Новоселов, 1974). Начальная влажность зерновки составляла 38,2%, температура агента сушки 550С и скорость его фильтрации 0,3 м/с. Установлено, что в конце процесса сушки при влажности поверхностного слоя зерновки 13,8%, влажность ее центральной части составляла 20,6%, т.е. отличалась в 1,5 раза.

Анализ проведенных исследований позволил установить, что комплексных исследований по определению полей влагосодержания и температуры в зерновке в процессе сушки при различных значениях начальной влажности зерна, температуры агента сушки и скорости его фильтрации не проводилось. При этом, температурные поля в исследовании не определялись и градиенты температуры и влагосодержания не рассчитывались. Не определялся также характер изменения градиента влагосодержания в процессе сушки, а также не исследован процесс выравнивания влажности

между центром и поверхностью зерновки в процессе отволаживания после сушки.

Изучение характера изменения влагосодержания важно для обоснования режимов сушки зерна. Установлено, что для сырого и влажного зерна при сравнительно низкой температуре и скорости фильтрации воздуха в начале процесса имеет место период постоянной скорости сушки, когда потоки влаги из центра к поверхности и с поверхности зерновки в окружающую среду уравнивают друг друга. При дальнейшей сушке с понижением влажности зерна, это соотношение нарушается, и сушка происходит в период убывающей скорости сушки, при этом с поверхности испаряется больше влаги, чем успевает подводиться из центральных слоев, в результате чего происходит углубление зоны испарения влаги внутрь зерновки и снижение эффективности сушки (Лыков, 1967; Рудобашта, 1980). В этом случае возникает неравномерность распределения во влагосодержании центральных и поверхностных частей зерновки, величина которого зависит от режимов сушки (Сушка зерна – суть проблемы, 2018) и объясняется значительной инерционностью поля влажности по сравнению с температурным полем, характеризуемым критерием Лыкова составляющим  $Lu = 10-3$  (Егоров, 1973; Гинзбург, 1976).

Неравномерность распределения влагосодержания вызывает внутреннее напряжение в зерновке и может привести к ее растрескиванию (Лыков, 1968; Гинзбург, 1976). Прежде всего это касается зерна подверженного трещинообразованию: риса, кукурузы, зернобобовых культур (Жидко, Резчиков, Уколов, 1982; Мачихина, Алексеева, Львова, 2007). Для предотвращения этого явления применяют осциллирующие режимы сушки, где в сушильных шахтах или теплообменниках сушилок дают зерну «отлежаться» без доступа агента сушки для выравнивая полей влагосодержания и температуры (Резчиков, 1991; Атаназевич, 1997; Малин, 2004; Голубкович, Павлов, 2018). Аналогично поступают в технологиях двухстадийной сушки, где устраивают отволаживание нагретого зерна в теплообменнике перед зоной его охлаждения, и в рециркуляционных зерносушилках, где в теплообменнике смешивается сырое и нагретое просушенное рециркулирующее зерно (Сорочинский, 2005, 2009; Малин, 2005; Юкиш, Ильина, Ильичев, 2015). В отличие от распределения влаги в процессе сушки, температура в зерновке быстро выравнивается, так как ее теплопроводность значительно превышает диффузию влаги. Однако, на начальных стадиях прогрева значения градиента температуры

также могут достигать значительных величин, что может тормозить процесс сушки за счет явления термовлагопроводности (Лыков, 1968; Резчиков, 1991; Муштаев, Ворошилов, Мандрыка, 2003).

На основании аналитического обзора и анализа ранее проведенных исследований можно выдвинуть гипотезу, что по мере прогрева зерновки и ее сушки будет происходить увеличение градиента влагосодержания между ее центром и поверхностью, который достигнув максимального значения будет уменьшаться, вследствие снижения общей влажности зерновки и влажности ее центральной части. При этом, с увеличением начальной влажности зерна максимальное значение градиента влагосодержания будет увеличиваться, а его снижение будет свидетельствовать об углублении зоны испарения влаги. Кроме того, в процессе отволаживания нагретого зерна в процессе сушки, вследствие разности концентраций будет происходить перемещение ее из центральных частей зерновки к поверхности, что приведет к выравниванию влажности по зерновке и снизит энергозатраты на ее дальнейшую сушку.

Для подтверждения этой гипотезы необходимо получение новых данных по распределению полей влагосодержания и температуры при сушке отдельных зерновок для уточнения максимальных значений градиентов влагосодержания и температуры и времени наступления этих значений при различной начальной влажности зерна, температуре и скорости фильтрации агента сушки, а также изучение скорости изменения полей влагосодержания в процессе отволаживания (отлежки) зерна в процессе сушки при различных режимах, определяющих разницу во влажности между центром и поверхностью зерновки.

## Материалы и методы

Настоящие исследования являются продолжением ранее проведенных исследований полей влагосодержания на модельном теле зерновки нута (Сорочинский, 2002), для увеличения области определения и получения новых расчетных зависимостей. Дополнительные исследования проводили на экспериментальной установке для определения полей влагосодержания на модельном теле зерновки нута прямым методом. Установка состоит из экспериментальной ячейки диаметром 100 мм, и высотой 200 мм, на сетчатом дне которой располагаются слоем

в одно зерно зерновки заданной начальной влажности; аэродинамической трубы на которой с помощью электромагнита устанавливается экспериментальная ячейка; вентилятора, просасывающего воздух через электрокалорифер с регулируемым количеством секций, и после нагрева, подающего его через регулируемую заслонку и диафрагму в аэродинамическую трубу. Расход воздуха измеряется при помощи микроманометра, температура внутри и на поверхности зерновки, а также сушильного агента – хромель-копелевыми термопарами в комплекте с автоматическим потенциометром типа КСП, температура и относительная влажность атмосферного воздуха измерялась психрометром.

Для подготовки зерновок к опытам используется термостат. Разрезание зерновок с выделением шарового сегмента осуществляется специальным устройством с параллельно расположенными ножами, а выделение составных частей шарового сегмента – пробойником с цилиндрическими ножами. Взвешивание составных частей зерновки осуществляется на торсионных весах типа ВТ с точностью до 1 мг. Сушка выделенных образцов проводилась в специальных кюветах из фольги – в сушильном шкафу типа СЭШ-3М. Влажность составных частей зерновок определяли по убыли массы по стандартной методике ГОСТ 13586.5-93. Влажность зерновки на поверхности рассчитывали исходя из параболического распределения влаги по сечению зерновки.

Для одной пробы используются по три зерновки. При этом определяется влажность центральной, средней и поверхностных частей зерновок при отборе опытных образцов в процессе сушки, а также, контрольно, определяется средняя влажность зерновок. Опыты проведены при начальной влажности зерна от 18,9 до 40,7%, температуре агента сушки 35, 50 и 70 °С и скорости фильтрации агента сушки равной 0,3, 0,5 и 1,0 м/с. Продолжительность опытов составляла от 90 до 240 мин в зависимости от температуры и скорости фильтрации агента сушки, отбор проб в каждом опыте осуществлялся через каждые 30 мин. Продолжительность измерения температуры в центре и на поверхности зерновки проводилась через 1, 5 и 10 минут, начальная влажность зерна в этих опытах составляла 15,3 – 36,6%. Для определения изменения влажности между центром и поверхностью зерновки в процессе отлежки в каждом опыте одновременно отбирались пробы и размещались в закрытых бюксах в воздушном термостате марки ТлС нагретом до температуры 450С. Продолжительность отлежки составляла 20,

40 и 60 мин во всех опытах. Начальная влажность зерна в этих опытах изменялась от 20,3 до 39,8%.

### Результаты исследования и их обсуждение

На Рисунке 1 показаны кривая сушки высоковлажной зерновки и изменение влажности между центром и ее поверхностью. Установлено, что при указанных режимных параметрах наблюдается, до продолжительности 125 минут, участок постоянной скорости сушки, после чего начинается период убывающей скорости. Примерно, на это же время приходится максимальное значение разницы влажности между центром и поверхностью зерновки. То есть максимальное влагонапряжение между центром и поверхностью зерновки приходится на период перехода от постоянной к убывающей скорости сушки. При этом скорость фильтрации агента сушки для единичной зерновки в диапазоне от 0,3 до 1,0 м/с не вносила существенных изменений в это распределение, то есть данный гидродинамический режим позволил отвести от зерновки всю испаряющую влагу.

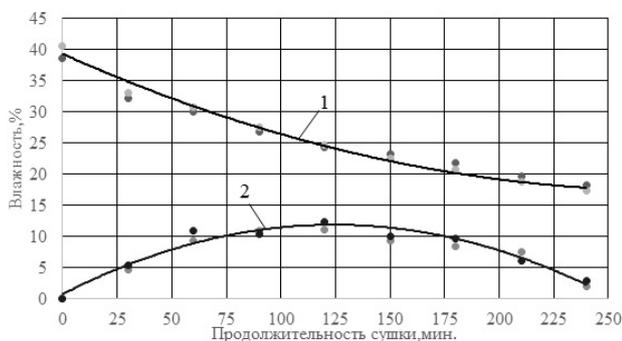


Рисунок 1. Изменение влажности зерновки (1) и разницы по влажности между ее центром и поверхностью (2) в процессе сушки. Начальная влажность зерновки  $W = 39,8\%$ , температура агента сушки  $350^{\circ}\text{C}$ , скорость его фильтрации  $0,3 - 1,0$  м/с.

Экспериментальными исследованиями распределения полей влагосодержания в зерновке в процессе сушки установлено значительное различие влагосодержания центра и поверхности зерновки. При этом в процессе сушки достижение максимальных значений этой разницы наблюдается в зависимости от ее начальной влажности (Рисунок 2). В дальнейшем эта величина уменьшается, что связано с завершением процесса сушки и снижением влажности зерна.

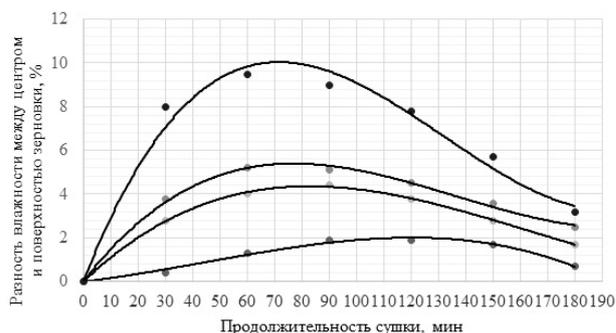


Рисунок 2. Различие по влажности между центром и поверхностью зерновки в процессе сушки: 1 – начальная влажность  $W = 18,9\%$ , 2 –  $22,3$ , 3 –  $30,8$ , 4 –  $36,2$ . Температура агента сушки  $t_{a.c.} = 50^{\circ}\text{C}$ , скорость фильтрации  $V_{\phi} = 0,5$  м/с.

Для расчета максимального значения разницы во влажности центра и поверхности зерновки в процессе сушки получено уравнение регрессии:

$$\Delta W_{\max} = 0,373W_n + 0,017 t_{a.c.} + 0,88 V_{\phi} - 5,4, \quad (1)$$

где  $\Delta W_{\max}$  – максимальное значение разницы между центром и поверхностью зерновки, %,  $W_n = 18,9 - 40,7\%$ ,  $t_{a.c.} = 35 - 70^{\circ}\text{C}$ , и  $V_{\phi} = 0,3 - 1,0$  м/с – соответственно, изменение в опытах начальной влажности зерна, температуры агента сушки и скорости его фильтрации. Коэффициент достоверности уравнения составляет  $R^2 = 0,9255$ .

Как видно из графика, максимальное различие для высоковлажного модельного тела зерновки нута при данных условиях изменяется от 2 до  $10^{\circ}\text{C}$  в зависимости от влажности зерновки. То есть поверхность зерновки может быть пересушена, а в центре оставаться избыточная влажность, что вызывает внутреннее напряжение в зерновке и может привести к ее растрескиванию. Кроме того, пересушивание поверхности зерна и углубление зоны испарения внутрь зерновки снижает интенсивность влагообмена, скорость сушки и увеличивает энергозатраты на сушку.

По результатам испытаний рассчитан градиент влагосодержания в зерновке, представленный на Рисунке 3. При этом учитывалось изменение ее эквивалентного диаметра от 6,4 до 8,3 мм в диапазоне влажности от 15 до 45% по зависимости:

$$D_{\text{экв.}} = 5,45 + 0,063 W, \quad (2)$$

где  $W$  – влажность зерна. Коэффициент достоверности уравнения составляет  $R^2 = 0,9354$ .

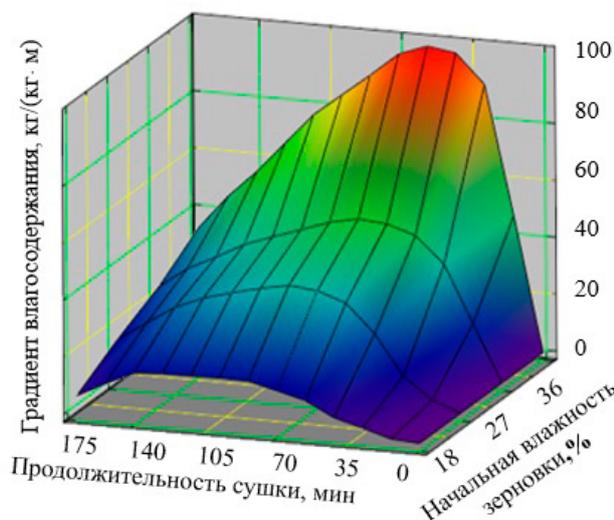


Рисунок 3. Изменение влагосодержания между центром и поверхностью зерновки в процессе сушки: температура агента сушки  $t_{a.c.} = 50^{\circ}\text{C}$ , скорость фильтрации  $V_{\phi} = 0,5$  м/с.

Как видно из графика, градиент влагосодержания в зерновке достигает значительных величин и имеет, в диапазоне влажности зерновки от 18,9 до 36,2%, при температуре сушильного агента  $50^{\circ}\text{C}$  и скорости его фильтрации 0,5 м/с, максимальное значение от 20 до 100 кг/(кг·м).

Для расчета максимального значения градиента влагосодержания в том же диапазоне параметров, как и для расчета различия по влажности между центром и поверхностью, уравнение примет вид:

$$U_{\max} = 6,87W_n + 0,17 t_{c.a.} + 27,0 V_{\phi} - 132,3, \quad (3)$$

где  $sU_{\max}$  - значение максимального градиента влагосодержания в зерновке, кг/(кг·м). Коэффициент достоверности уравнения составляет  $R^2 = 0,8554$ .

Как видно из полученных уравнений, различие между центром и поверхностью зерновки и, соответственно, градиент влагосодержания, возрастает как с увеличением начальной влажности зерна, так и с возрастанием температуры и скорости фильтрации агента сушки, что соответствует физическому смыслу, вследствие увеличения интенсивности испарения влаги из зерна с увеличением этих параметров.

Для разработки режимов сушки важное значение имеет время наступления максимального значения различия между центром и поверхностью

зерновки с целью организации, например, зон отволаживания и предотвращения углубления зоны испарения влаги внутрь зерновки, которое приводит к снижению эффективности сушки и возможному ухудшению качества зерна. Для расчета этой величины в том же диапазоне параметров получено соответствующее уравнение:

$$t_{\max} = 267,4 - 1,77W_n - 2,26t_{c.a.} - 50,0 V_{\phi}, \quad (4)$$

где  $t_{\max}$  - время достижения максимального значения градиента влагосодержания между центром и поверхностью зерновки, мин. Коэффициент достоверности уравнения составляет  $R^2 = 0,9251$ .

С увеличением начальной влажности зерна, температуры и скорости фильтрации агента сушки время достижения максимального значения градиента влагосодержания между центром и поверхностью зерновки в процессе сушки уменьшается. Так, для скорости фильтрации агента сушки, например, 1,0 м/с и его температуре  $70^{\circ}\text{C}$  время наступления максимального значения градиента влагосодержания при сушке и влажности зерна 25 и 17% наступает соответственно через 15 и 29 минут, при этом максимальные значения градиента влагосодержания будут составлять соответственно 78,4 и 23,5 кг/(кг·м).

В процессе отволаживания нагретого зерна происходит перераспределение влаги между центром и поверхностью зерновки, влага из центра перемещается к поверхности за счет разницы во влагосодержании, что способствует в дальнейшем более экономичному процессу сушки (Рисунок 4).

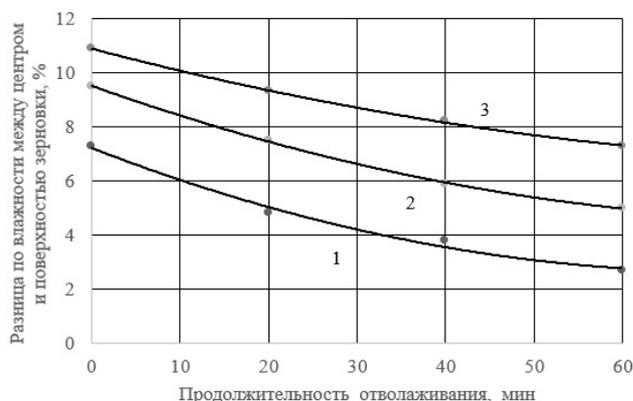


Рисунок 4. Изменение разницы влажности между центром и поверхностью зерновки от продолжительности отволаживания: 1 – влажность зерновки  $W = 18,6\%$ ; 2 – 22,4; 3 – 29,2. Температура отволаживания  $t_t = 45^{\circ}\text{C}$ .

Обычно в теплообменниках зерносушилок продолжительность отволаживания составляет 10–15 мин и ограничивается вместимостью надсушильных бункеров, однако в технологиях двухстадийной сушки, где отволаживание имеет самостоятельное значение, продолжительность отлежки может быть значительно больше и достигать нескольких часов.

Установлено, что эффективность этого процесса зависит от влажности зерновки, температуры и продолжительности отволаживания. При этом, различие между центром и поверхностью зерновки при температуре отволаживания 45°C и влажности 18,6 – 29,2%, снижается в этом процессе за 40 минут соответственно в 1,3 – 2,0 раза, а за 60 минут – в 1,4–2,7 раз и составляет соответственно 3,4 – 8,2% и 2,1 – 7,0%, т.е. процесс перераспределения влаги в нагретой зерновке происходит существенно интенсивнее, чем это указывается в исследованиях (Сушка зерна-суть проблемы, 2018), проведенных, видимо, при комнатной температуре.

Для расчета изменения разницы по влажности между центром и поверхностью зерновки в процессе отволаживания получено уравнение регрессии:

$$\Delta W_{ц-п} = 0,476W - 0,064 \tau_{отл} - 2,31, \quad (5)$$

где  $W_{ц-п}$  - значение разницы между центром и поверхностью зерновки, %,  $W = 12,4 - 30,8\%$  - значение влажности зерновки в процессе отволаживания;  $\tau_{отл} = 20, 40$  и  $60$  мин. - продолжительность отволаживания;  $\tau_{отл} = 45^\circ\text{C}$  - температура отволаживания.

При этом температура агента сушки в опытах составляла  $t_{a.c.} = 35 - 70^\circ\text{C}$ , скорость фильтрации  $V_\phi = 0,3 - 1,0$  м/с, начальная влажность зерна до сушки  $W_n = 21,7 - 40,7\%$ , продолжительность сушки  $\tau_{суш} = 90 - 210$  мин. Коэффициент достоверности уравнения составляет  $R^2 = 0,7679$ .

Для измерения температуры центральной части зерновки и разницы температур между центральной частью и поверхностным слоем в процессе ее нагрева и сушки использовались обыкновенная и дифференциальная термопары. Получено уравнение для расчета температуры центра зерновки:

$$\Theta_{ц} = 0,91\tau_c - 0,27W_n + 0,9t_{c.a.} + 5,67V_\phi - 5,15, \quad (6)$$

где  $\Theta_{ц}$  - температура в центре зерновки, °C,  $W_n = 15,3 - 44,7\%$  - начальная влажность зерновки,

$\tau_c = 1 - 10$  мин. - продолжительность нагрева зерновки;  $t_{a.c.} = 35 - 70^\circ\text{C}$  - температура агента сушки. Коэффициент достоверности уравнения составляет  $R^2 = 0,9833$ .

Установлено, например, что при нагреве зерновки нута при незначительной влажности 9,8 – 15,5% температура ее центра довольно быстро, уже через 5 и 7 мин приближается к температуре агента сушки. Однако, для сырого зерна с увеличением влажности до 19,1 – 37,4% эта разность остается существенной даже через 10 минут (Рисунок 5).

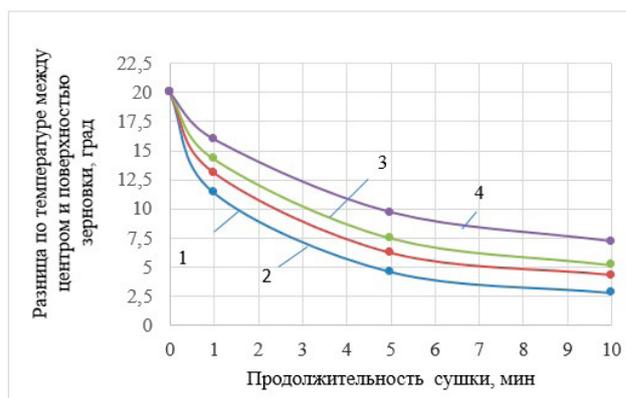


Рисунок 5. Разность температур между центром зерновки и агентом сушки в зависимости от начальной влажности зерновки: 1 - начальная влажность зерновки  $W_n = 15,3\%$ ; 2 – 21,0; 3 – 27,2; 4 – 33,2. Начальная температура зерновки  $200^\circ\text{C}$ , температура агента сушки  $35^\circ\text{C}$ , скорость фильтрации агента сушки  $0,3$  м/с.

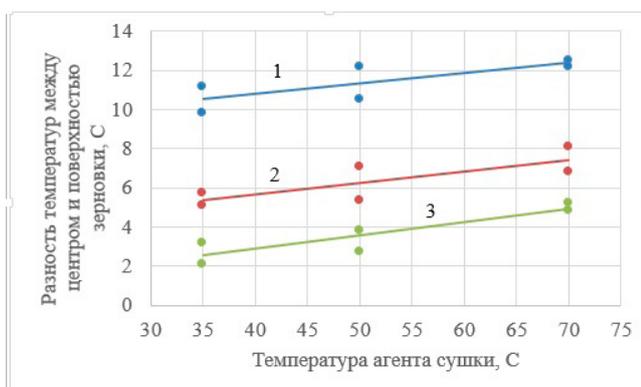
Для расчета изменения разницы температур между центром зерновки и агентом сушки получено уравнение регрессии:

$$\Delta\Theta_{ц-п} = 6,43 + 0,25W_n + 0,098t_{c.a.} - 6,44V_\phi - 0,86\tau_c, \quad (7)$$

где  $\Delta\Theta_{ц}$  - значение разницы температур между центром зерновки и ее поверхностью, %,  $W_n = 15,3 - 44,7\%$  - начальная влажность зерновки,  $\tau_c = 1 - 10$  мин – продолжительность сушки;  $t_{a.c.} = 35 - 70^\circ\text{C}$  - температура агента сушки. Коэффициент достоверности уравнения составляет  $R^2 = 0,9525$ .

Как видно из этого уравнения скорость фильтрации агента сушки влияет на разницу температур между центром и поверхностью зерновки и с ее увеличением эта разность уменьшается за счет увеличения коэффициента теплоотдачи и увеличения количества передаваемой теплоты. При этом с увеличением температуры агента сушки эта разность увеличивается за счет быстрого прогрева поверхности зерновки.

Разность температур между центром зерновки и ее поверхностью в начальный момент ее прогрева и сушки может достигать значительных величин (Рисунок 6). При температуре агента сушки от 35 до 70°C через 1 минуту она составляет 11,2 – 12,5 °С, что определяет значительный поток термодиффузии, затрудняющий процесс сушки. Даже через 10 минут разность температур сохраняется и составляет 3,2 – 4,8°C. Это согласуется с литературными данными (Лыков, 1968), о том, «что даже очень мелкие частицы имеют значительный перепад температур, обусловленный тем, что происходит прогрев не сухого, а влажного тела, в котором перепад температур создается в основном за счет испарения». При этом влага с поверхности зерновки быстро испаряется и она быстро прогревается.



**Рисунок 6.** Сравнение экспериментальных и расчетных данных по разности температур между центром зерновки и ее поверхностью в зависимости от температуры агента сушки: 1 - продолжительность сушки 1 мин; 2 - 5; 3 - 10. Начальная влажность зерновки 26,1%, скорость фильтрации агента сушки 1,0 м/с.

В диапазоне начальных значений влажности зерновки  $W_n = 15,1 - 32,6\%$ , температуры агента сушки  $t_{a.c.} = 35 - 70^\circ\text{C}$  и продолжительности процесса от 2 до 10 минут для расчета градиента температур в зерновке между ее центром и поверхностью получено уравнение:

$$\nabla\theta = 1,73 + 0,021t_{a.c.} - 0,95 V_\phi - 7,3 \cdot 10^{-3} W - 0,108\tau, \quad ^\circ\text{C}/\text{мм} \quad (8)$$

Коэффициент достоверности уравнения составляет  $R^2 = 0,8911$ .

В процессе прогрева и сушки зерновки градиент температуры снижается с ростом ее начальной влажности, вследствие увеличения теплопроводности зерновки и с ростом скорости агента сушки в связи с увеличением теплопередачи, а также возрастает с увеличением температуры агента сушки.

В том же диапазоне изменения параметров рассчитать максимальное значение градиента температуры и время его наступления можно по уравнениям (8) и (9):

$$\nabla\theta_{\max} = \exp(0,037t_{a.c.} - 0,026 W_n + 0,853 V_\phi - 0,287), \quad ^\circ\text{C}/\text{мм} \quad (9)$$

$$\tau_{\max} = 1,1 + 0,017 W_n - 0,684 V_\phi - 9,1 \cdot 10^{-3} t_{a.c.}, \quad \text{мин} \quad (10)$$

Коэффициенты достоверности этих уравнений составляют соответственно  $R^2 = 0,9528$  и  $R^2 = 0,8836$ .

## Заключение

В работе представлены результаты экспериментальных исследований полей температуры и влагосодержания в процессе сушки зерна на примере модельного тела зерновки нута в зависимости от начальной влажности зерна, температуры и скорости фильтрации агента сушки. Подтверждена гипотеза о том, что в зависимости от режимных параметров сушки различия по влажности между центром и поверхностью зерновки могут достигать значительных величин. Для влажного и сырого зерна эти значения составляют соответственно до 2 и 10% в натуральном исчислении. Максимальное влагонапряжение между центром и поверхностью зерновки приходится на период перехода от постоянной к убывающей скорости сушки. Время достижения максимальных значений градиента влагосодержания зависит от начальной влажности зерна, температуры и скорости фильтрации агента сушки. Для расчета максимального значения разницы во влажности центра и поверхности зерновки в процессе сушки и максимального значения градиента влагосодержания, а также времени достижения этого значения получены расчетные уравнения.

Установлено также, что в процессе отволаживания зерна при перераспределении влаги между центром и поверхностью зерновки эффективность этого процесса зависит от влажности зерновки и его продолжительности. Получены уравнения для расчета изменения разницы по влажности между центром и поверхностью зерновки в процессе отволаживания.

Определена разность температур между центром зерновки и агентом сушки, которая зависит от начальной влажности зерновки, температуры агента сушки, скорости его фильтрации и продолжительности нагрева и сушки, которая в начальный момент ее нагрева может достигать значительных величин. Получены уравнения

для расчета максимального значения градиента температуры и времени его достижения.

Результаты исследования служат основанием для разработки режимов сушки зерна, прежде всего подверженного трещинообразованию, и определения зон его отволаживания (отлежки) в шахтных прямоточных и рециркуляционных зерносушилках при их проектировании, для снижения энергозатрат при сушке и сохранения качества зерна.

### Литература

- Атаназевич В. И. Сушка зерна. М.: Лабиринт, 1997. 256 с.
- Аэров М. Э., Тодес О. М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1968. 512 с.
- Гинзбург А. С. Расчет и проектирование сушильных установок. М.: Агропромиздат, 1985. 336 с.
- Гинзбург А. С., Громов М. Л., Красовская В. С., Уколов В. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов. М: Пищевая промышленность, 1975. 224 с.
- Гинзбург А. С. Технология сушки пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1976. 248 с.
- Голубкович А. В., Павлов С. А. Исследование кинетики комбинированного режима сушки семян // Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства. Сб. науч. тр. Междунар. научно-технич. семинара, посвященного 175-летию со дня рождения К. А. Тимирязева. 2018. С. 170-175.
- Грачева Н. Н., Руденко Н. Б. Экспериментальные исследования изменения температуры поверхности и центра зерновок при различных режимах сушки зерна // Хранение и переработка зерна. 2014. № 5. С. 48-49.
- Егоров Г. А. Влияние тепла и влаги на процессы переработки и хранения зерна. М.: Колос, 1973. 264 с.
- Жидко В. И., Резчиков В. А., Уколов В. С. Зерносушение и зерносушиллки: учебник. М.: Колос, 1982. 239 с.
- Лыков А. В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 472 с.
- Малин Н. И. Энергосберегающая сушка зерна. М.: КолосС, 2004. 240 с.
- Малин Н. И. Технология хранения зерна. М.: КолосС, 2005. 280 с.
- Меленевская Н. М. Применение метода радиоактивных индикаторов для исследования форм связи и коэффициента диффузии влаги в зерне // Труды III Всесоюз. Сопещения по тепломассообмену. Минск: Изд. АН БССР, 1968. Т. 6. С. 43-45.
- Мачихина Л. И., Алексеева Л. В., Львова Л. С. Научные основы продовольственной безопасности зерна (хранение и переработка). М.: ДеЛи принт, 2007. 382 с.
- Муштаев В. И., Ворошилов А. П., Мандрыка Е. А. Техника сушки дисперсных материалов в аппаратах с устойчивыми виброожиженными и пульсирующими слоями. М.: Наука, 2003. 302 с.
- Новоселов С. В. Определение полей влагосодержания в отдельно взятом зерне в процессе сушки // Труды ВНИИЗ. М., 1974. Вып. 80. С. 17-22.
- Перцовский Е. С. Использование радиоактивного индикатора для изучения распределения влаги в зерне // Сообщения и рефераты ВНИИЗ. М., 1961. Вып. 2. С. 15-17.
- Резчиков В. А. Теория и практика энергосбережения при сушке зерна: Обзорная информация. Сер. Элев. пром-сть. М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1991. 57 с.
- Рудобашта С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой. М.: Химия, 1980. 248 с.
- Сахаров Э. В., Егоров Г. А., Коротков В. К., Шубин А. С. Исследование внутреннего влагопереноса в зерне методом автордиографии // Сб. науч. тр. / ВЗИПП. М.: 1971. С. 43-47.
- Сорочинский В. Ф. Эффективность сушки зерна на зерносушилках различных типов // Хлебопродукты. 2009. № 3. С. 42-43.
- Сорочинский В. Ф. Изменение коэффициентов диффузии влаги и массоотдачи единичной зерновки в процессах сушки и охлаждения // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) – СЭТТ 2002. Труды 1-й Междунар. научно-практ. конф. / Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина. М., 2002. С. 76-79.
- Сорочинский В. Ф. Эффективность устройств предварительного нагрева зерна шахтных зерносушилок // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов): сб. науч. тр. 2-й Междунар. научно-практ. конф. М.: МЭИ, 2005. Т. 1. С. 205-209.
- Сушка зерна – суть проблемы [Электронный ресурс]. 2018. URL: [www.agropromex.ru](http://www.agropromex.ru).
- Тарутин В. П. Исследование процесса и создание аппарата для обработки зерна пшеницы паром: автореф. дисс. канд. техн. наук. М., 1974. 26 с.
- Юкиш А. Е., Ильина О. А., Ильичев Г. Н. Технология и организация хранения зерна: учебник. М.: ДеЛи плюс, 2015. 476 с.

# Change of Limits of Humidity and Temperature when Drying Grain Crops

**Vladimir F. Sorochinsky**

*All-Russian Scientific and Research Institute for Grain and Products of its Processing – branch «V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems» of Russian Academy of Sciences.  
11 Dmitrov highway, 11, Moscow, Russian Federation, 127434  
E-mail: vlafest@bk.ru*

**Alexei L. Dogadin**

*All-Russian Scientific and Research Institute for Grain and Products of its Processing – branch «V.M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems» of Russian Academy of Sciences.  
11 Dmitrov highway, 11, Moscow, Russian Federation, 127434  
E-mail: dogadin1@inbox.ru*

The developed experimental installation that created for testing and obtaining results during the experimental research of measurement of humidity and temperature in the course of drying and also control of temperature for maturing of chick-pea. Which depends on differences in humidity of parameters of a way between the center and the surface of grain can reach up to 10% In this case the maximum level of a temperature difference during drying between the center and the surface of grain corresponds to transition from the constant speed of drying, to the decreasing speed of drying and increases at the initial humidity of grain, temperature and speed filtering the moisture absorber. The regress equations for calculating of the maximum value of this size, the same as maximum value of humidity of a gradient in grain and time of achievement of this value. Also it was found that in the course of temperature control of hot grain under the temperature of 45 degrees, characteristic of an binning, redistribution of humidity happens between the center and the surface of grain, the humidity from the center goes to a surface that does more economic in the future drying process. At the same time the efficiency of process depends on humidity and duration of storage of grain and difference between the center and the surface of grain with an indicator of humidity 27.5; 1.4 – 2.7 times are reduce by 13.3% in the course of a binning within 40 minutes, respectively, at 1.3 – 2.0 time, and within 60 minutes. The resulting estimated equation, that defines this level, depending on initial humidity during grain storage. The received equations, define dependence between a difference of temperatures, temperature of drying and drying of the center of grain, also as calculations of the maximum temperature gradient in grain and time of its achievement. Dependences can be used for design the grain drying modes.

**Keywords:** grain, drying agent, heat, moisture and temperature fields, gradient, regression equation, heat and mass transfer

## References

- Atanazevich V. I. Sushka zerna [Grain drying].. M.: Labirint, 1997. 256 s.
- Aerov M. E.. Todes O. M. Gidravlicheskiye i teplovyye osnovy raboty apparatov so statsionarnym i kipyashchim zernistym sloyem [Hydraulic and thermal fundamentals of operation of apparatuses with stationary and boiling granular layer]. L.: Khimiya. 1968. 512 s.
- Ginzburg A. S. Raschet i proyektirovaniye sushilnykh ustanovok [Calculation and design of drying plants]. M.: Agropromizdat. 1985. 336 s.
- Ginzburg A. S.. Gromov M. L.. Krasovskaya V. S.. Ukolov V. S. Teplofizicheskiye kharakteristiki pishchevykh produktov i materialov [Thermophysical characteristics of food and materials]. M: Pishchevaya promyshlennost. 1975. 224 s.
- Ginzburg A. S. Tekhnologiya sushki pishchevykh produktov [The technology of drying food products]. M.: Pishchevaya promyshlennost. 1976. 248 s.
- Golubkovich A. V. Pavlov S. A. Issledovaniye kinetiki kombinirovannogo rezhima sushki semyan // Sushka. khraneniye i pererabotka produktsii rasteniyevodstva. Study of the kinetics of the combined mode of seed drying // Drying, storage and processing of crop production. 2018. S. 170-175.
- Gracheva N. N.. Rudenko N. B. Eksperimentalnyye issledovaniya izmeneniya temperatury poverkhnosti i tsentra zernovok pri razlichnykh

- rezhimakh sushki zerna. Experimental study of temperature changes of the surface and the center of grains with different modes of drying of grain // *Khraneniye i pererabotka zerna*. 2014. № 5. S. 48-49.
- Egorov G. A. Vliyaniye tepla i vlagi na protsessy pererabotki i khraneniya zerna [Influence of heat and moisture on grain processing and storage]. M.: Kolos. 1973. 264 s.
- Zhidko V.I., Rezchikov V.A., Ukolov V.S. Zernosusheniye i zernosushilki: uchebnik [Grain drying and dryers]. M.: Kolos. 1982. 239 s.
- Lykov A. V. Teoriya sushki [Drying theory]. M.: Energiya. 1968. 472 s
- Malin N. I. Energoberegayushchaya sushka zerna [Energy-saving grain drying]. M.: KolosS. 2004. 240 s.
- Malin N. I. Tekhnologiya khraneniya zerna [Grain storage technology]. M.: KolosS. 2005. 280 s.
- Melenevskaya N. M. Primeneniye metoda radioaktivnykh indikatorov dlya issledovaniya form svyazi i koeffitsiyenta diffuzii vlagi v zerne Application of the method of radioactive indicators for the study of forms of communication and diffusion coefficient of moisture in the grain // *Trudy III Vsesoyuz. Soveshchaniya po teplomassoobmenu*. Minsk: Izd. AN BSSR. 1968. T. 6. S. 43-45.
- Machikhina L. I., Alekseyeva L. V., Lvova L. S. Nauchnyye osnovy prodovolstvennoy bezopasnosti zerna (khraneniye i pererabotka) [Scientific bases of food safety of grain (storage and processing)]. M.: DeLi print. 2007. 382 s.
- Mushtayev V. I., Voroshilov A. P., Mandryka E.A. Tekhnika sushki dispersnykh materialov v apparatakh s ustoychivymi vibroozhizhennymi i pulsiruyushchimi sloyami [The technique of drying disperse materials in the apparatus with a stable vibrosignal and pulsating layers]. M.: Nauka. 2003. 302 s.
- Novoselov S. V. Opredeleniye poley vlagosoderzhaniya v otdelno vzyatom zerne v protsesse sushki // *Trudy VNIIZ* [Determination of moisture content fields in a single grain during drying // *Proceedings of VNIIZ*]. M.. 1974. Vyp. 80. S. 17-22.
- Pertsovskiy E. S. Ispolzovaniye radioaktivnogo indikatora dlya izucheniya raspredeleniya vlagi v zerne // *Soobshcheniya i referaty VNIIZ* [The use of a radioactive indicator to study the distribution of moisture in the grain // *Messages and abstracts VNIIZ*]. M.. 1961. Vyp. 2. S. 15-17.
- Rezchikov V. A. Teoriya i praktika energosberezheniya pri sushke zerna: Obzornaya informatsiya. Ser. Elev. prom-st. M.: TsNIITEI khleboproduktov. 1991. 57 s.
- Rudobashta S. P. Massoperenos v sistemakh s tverdoy fazoy [Mass transfer in solid phase systems]. M.: Khimiya. 1980. 248 s.
- Sakharov E. V., Egorov G. A., Korotkov V. K., Shubin A. S. Issledovaniye vnutrennego vlagoperenosa v zerne metodom avtoradiografii // *Sb.nauch.tr. / VZIPP*. A study of internal moisture transfer in the grain by the method of autoradiography // *Proc.scientific. Tr. / AUCIFI M.*: 1971. S. 43-47.
- Sorochinskiy V. F. Effektivnost sushki zerna na zernosushilkakh razlichnykh tipov Efficiency of grain drying on grain dryers of various types // *Bakery products.* // *Khleboprodukty*. 2009. № 3. S. 42-43.
- Sorochinskiy V. F. Izmeneniye koeffitsiyentov diffuzii vlagi i massootdachi edinichnoy zernovki v protsessakh sushki i okhlazhdeniya // *Sovremennyye energosberegayushchiye teplovyye tekhnologii (sushka i termovlazhnostnaya obrabotka materialov) – SETT 2002*. *Trudy 1-y Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. / Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet im. V. P. Goryachkina*. Changes in the coefficients of moisture diffusion and mass transfer of a single grain in the drying and cooling processes // *Modern energy-saving thermal technologies (drying and thermal moisture treatment of materials) – SETT 2002*. *Proceedings of the 1st international. scientific practice. Conf. / Moscow state University named after agroinzhenernyy. V. P. Goryachkin.*M.. 2002. S. 76-79.
- Sorochinskiy V. F. Effektivnost ustroystv predvaritelnogo nagreva zerna shakhtnykh zernosushilok // *Sovremennyye energosberegayushchiye teplovyye tekhnologii (sushka i termovlazhnostnaya obrabotka materialov): sb.nauch.tr. 2-y Mezhdunar. nauchno-prakt. konf* Efficiency of devices of preliminary heating of grain of mine grain dryers // *Modern energy-saving thermal technologies (drying and thermal and moisture treatment of materials): sat. nauch. Tr. 2nd international. scientific practice. Conf.*. M.: MEI. 2005. T. 1. S. 205-209.
- Sushka zerna – sut problemy [Elektronnyy resurs] [Grain drying – the essence of the problem]. 2018. URL: [www.agropromex.Ru](http://www.agropromex.Ru).
- Tarutin V. P. Issledovaniye protsessa i sozdaniye apparata dlya obrabotki zerna pshenitsy parom: avtoref. diss. kand. tekhn. Nauk [Research of process and creation of the device for processing of grain of wheat by steam]. M.. 1974. 26 s.
- Yukish A. E., Ilina O. A., Ilichev G. N. Tekhnologiya i organizatsiya khraneniya zerna: uchebnik [Technology and organization of grain storage]. M.: DeLi plyus. 2015. 476 s.