



Моделирование экосистем хранения продуктов с использованием установки имитации вентилирования и хранения собранного урожая (PHAST) в условиях близких к реальным.

Dirk E. Maier^{a*}, Klein E. Iklej^a, Michael D.

Montross^a

Краткий обзор

Разработанная ранее конечноэлементная модель движения тепла, массы и кинетической энергии зерна во время вентилируемого и не вентилируемого хранения использовала традиционную теорию миграции влаги. Под миграцией влаги подразумевается перемещение избыточной влажности в массе зерна во время непрветриваемого хранения. Это может привести к порче зерна. Для непрветриваемого бункера с диаметром 5.5 m и высотой 11.0 m в Индианаполисе, в течение 12 месяцев хранения было рассчитано незначительное накопление влаги на открытой верхней поверхности объема (менее чем 0.1 %). Модель использовала проницаемые границы, которые позволяли возникающим естественным конвекционным потокам перемещаться в свободном и заполненном пространстве. Это показало, что миграция влаги в традиционном понимании не происходила, взамен была разработана более реалистичная теория баланса влажности между массой зерна и заполненным и не заполненным пространствами. Накопление влаги в верхних слоях массы зерна происходит главным образом из-за естественных конвекционных потоков, которые протекают через свободное пространство. Управляя колебаниями относительной влажности незаполненного пространства, можно свести к минимуму накопление влаги в верхних слоях зерна, хранящегося в бункере.

Введение

Два наиболее важных показателя, влияющих на качество зерна во время хранения - это температура и влажность (et al. Ross, 1973). Миграция влаги во время непрветриваемого хранения, вызванная естественными конвекционными потоками, порожденными температурными перепадами, была отмечена множеством исследователей (et al. Ross, 1973; Pierce и Shelton. 1984; Wilcke и Van Fossen. 1986). Миграция влаги определена как перемещение избыточной влажности внутри зерновой массы, вызванное конвекционными потоками и диффузией во время непрветриваемого хранения, которое может привести к слипанию зерна, спеканию и/или порче его. Многочисленные цифровые модели и полевые испытания показали возможные варианты миграции влаги во время непрветриваемого хранения.

Спекание верхних слоев наблюдалось после 6 месяцев хранения в Австралии, в бункерах, в которых зерно хранилось при относительной влажности 9-11% и температурах более 40 °C (Griffith, 1964). Однако, никакого спекания не наблюдалось при начальных температурах ниже чем 15 °C, даже когда средняя влажность была 14.4%. Hellevang и Hirning (1988) проверяли 16 бункеров различных размеров в промежутке Апрель- Август. Они наблюдали понижение влажности в среднем на 2.6% на верхней поверхности и увеличение в среднем на 0.5% на глубине от 0.6 до 1.8 m ниже верхней поверхности. Khankari et al. (1995) рассчитал модель непрветриваемого зернохранилища, которая не учитывала солнечное излучение, использовала ежедневные средние температурные данные для стены и пустого пространства, и предполагала непроницаемые границы пустого пространства. Когда модель была применена к хранению более 1 года в бункере с диаметром 10 m и высоты 10 m в Миннеаполисе, влажность в верхней части увеличилась теоретически приблизительно на 1 %. Если использовалась большая проницаемость, то влажность в пустом пространстве возросла на 3.5 % и бункер охлаждался зимой быстрее из-за более сильных естественных конвекционных потоков. При имитации глубокой силосной башни (10 m диаметр и высота 20 m), влажность возросла на 1.5%.

Casada и Yung (1994), учитывали солнечное излучение и проницаемые границы в их модели перемещения тепла, массы и кинетической энергии зерна во время транспортировки арахиса железнодорожными вагонами. Во время транспортировки арахиса ими было обнаружено, что влажность возросла теоретически на 1.3 %. Они указали на возможность возникновения конденсата из-за дневного нагрева пустого пространства. Это могло привести к увеличению влажности в верхней части вагона. Тем не менее, модель не предсказывает долгосрочное перемещение влаги конвекционными потоками или диффузией, так как существенный источник влаги накапливается за время 3-недельной перевозки груза.

Перечисленные исследования приведены с целью:

- приложить прежде разработанную цифровую модель хранения зерна к стандартному размеру бункера: и
- предложить альтернативное объяснение для перемещения влажности и накопления ее во время непрветриваемого хранения.

Материалы и методы

Для расчета температуры и влажности в непрветриваемом бункере, расположенном в Индианаполисе, была использована Установка имитации вентилирования и хранения собранного урожая, использующая метод конечных элементов (PHAST-FEM), описанная Montross (1999) и Montross et al. (2002a,b). В Табл. 1 указана спецификация бункера, использовавшегося в имитационном анализе. Для бункера были использованы восьмиузловые параболические элементы одинакового размера (0.46 m к 0.46 m), чтобы устранить возможные различия, вызванные размерами элементов. Параметры материалов, использованных в аналитической модели, даны в Табл. 2. Допускалось, что зерновая масса (кукуруза) была первоначально одной температуры и влажности и что бункер не вентилировался во время хранения.



ТАБ 1. Спецификация Бункера, использованного в аналитической модели

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Диаметр, m | 5.50 |
| Высота, m | 11.00 |
| Вместимость, t | 186.90 |
| Отношение высота/диаметр | 2:1 |
| Отношение площадь поверхности/объем | 0.91 |

ТАБ 2. Входные параметры, использованные в аналитической модели

| Параметр | Величина |
|--|--|
| Имитационные даты | 10/1/86 - 10/1/87 |
| Начальная температура, °C | 16 |
| Начальная влажность, % w.b. | 14 |
| Уклон крыши | 30° |
| Высота стены в пустом пространстве | 0.1 m |
| Высота заполненного пространства | 0.3 m |
| Показатель Проникновения в заполненное пространство ^a | 3.0 объемы/h |
| Показатель Проникновения в свободное пространство ^a | 3.0 объемы/h |
| Коэффициенты передачи Тепла (на стене и крыше) ^a | 4.0 W m ⁻² °C ⁻¹ |
| Коэффициенты передачи Тепла поверхности зерна | 1.0 W m ⁻² °C ⁻¹ |
| Насыпная плотность | 612 kg/m ³ |
| Специфическое тепло ^a | 1465+35.6*M (J kg ⁻¹ °C ⁻¹) |
| Термическая удельная электропроводность ^c | 0.1409+0.00112*M (W m ⁻¹ °C ⁻¹) |
| Пористость ^c | 0.38 |
| Длинноволновой коэффициент излучения ^d | 0.26 |
| Коротковолновой коэффициент излучения ^d | 0.66 |
| Проницаемость ^e | 3.5 x 10 ⁻⁹ (m ²) |
| Уравнение баланса влажности | Модифицированное уравнение Henderson |

^aMaier(1992); ^bMuirr et al. (1980); ^cBrooker et al. (1992); ^dKreith (1976); ^eKhankari et al. (1995)

Модель зернового бункера была решена с использованием двух комплектов условий границ - реального и нереального. Условия реальной границы подразумевали поверхности, проницаемые естественными конвекционными потоками свободного и заполненного пространства учитывали солнечное излучение, передачу тепла ветром и конвекционную передачу тепла и массы между пустым и заполненным пространством. Условия нереальной границы были основаны на непроницаемых поверхностях зерна, пренебрегали солнечным излучением и применяли к свободному и заполненному пространству постоянные температуры, основываясь на ежечасной окружающей температуре. Все расчеты использовали ежечасные данные о погоде из SAMSON (Anon., 1993) - базы данных о погоде в Индианаполисе.

Результаты и дискуссия

Естественные конвекционные потоки

Рис. 1 показывает 8 случаев распределения потоков в бункере с непроницаемыми границами в течении года. Состояние поверхностей стены, свободного и заполненного пространства были взяты по ежечасной окружающей температуре, солнечное излучение и ветер не учитывались, как и передача тепла и массы от поверхности зерна. Отрицательная функция течения указана на графиках естественных конвекционных потоков. Для того, чтобы вычислять компоненты скорости, функция течения дифференцировалась. Замкнутые линии течения приводят к мощным конвекционным потокам, когда функция течения меняется. Если приняты условия непроницаемой границы, естественные конвекционные потоки движутся по замкнутым линиям внутри массы зерна соответственно тому, как было прежде сообщено в литературе (et al. Khankari, 1995). К 1 Февраля направления течения (Рис. 1b) показали стандартный циклический образец и были замкнуты около стены и центральной оси,



что давало в результате мощный конвекционный поток, проходящий через центр и опускающийся около стены. Максимальная величина функции потока в Феврале была приблизительно $5 \text{ m}^2/\text{d}$, и уменьшилась приблизительно до $1 \text{ m}^2/\text{d}$ между Мартом и Маем. Небольшие отклонения функции течения в промежутке между Мартом и Маем соответствуют небольшим естественным конвекционным потокам, что незначительно влияет на температуру кукурузы или ее влажность. К Маю естественные конвекционные потоки развернулись и текли в противоположном направлении. Воздушные течения поднимались около стены и опускались через центр бункера. К Июню (Рис. 1f) функция течения имела величину близкую к максимальной зимней величине около $4 - 5 \text{ m}^2/\text{d}$, но направлением против часовой стрелки. В Июле (Рис. 1g) и Августе (Рис. 1h) функция течения уменьшилась приблизительно до $3 \text{ m}^2/\text{d}$.

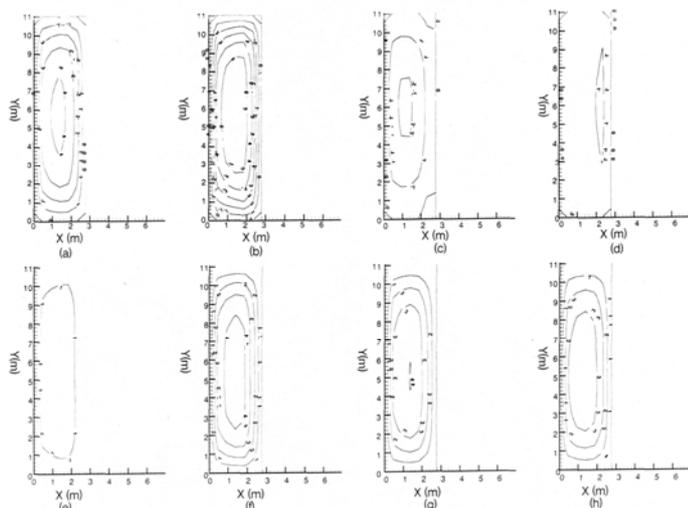


Рис. 1. Графики функции течения в бункере с непроницаемыми границами на 1 января (а), 1 февраля (б), 1 марта (с), 1 апреля (д), 1 мая (е), 1 июня (ф), 1 июля (г), 1 августа (h).

На Рис. 2 тот же бункер, но с условиями реалистичной границы, включая солнечное излучение, проницаемые границы свободного и заполненного пространства, обмен теплом с окружающим воздухом, и обмен теплом и массой между заполненным и свободным пространством. 1 Января (Рис. 2а) величина функции потока составила приблизительно на 20% меньше от случая с условиями неральной границы (Рис. 1а). Основным различием между случаями с проницаемыми и непроницаемыми границами явилось распределение функции потока и направление функции потока около стены. Когда солнечное излучение стало учитываться, зерно периферии бункера стало нагревателем во время хранения. Солнечное излучение минимизировало температурные перепады во время зимних месяцев. В центре бункера осталось тепло, а солнечное излучение вокруг стены бункера ограничило охлаждение зерна. Температурные перепады в радиальных направлениях внутри бункера приводили в движение естественные конвекционные потоки. Учет действия солнечного излучения минимизировал температурные перепады в радиальных направлениях и в результате уменьшил конвекционные потоки. Только внутренность бункера показала традиционные циклические конвекционные потоки, возникающие обычно. Циклический конвекционный поток возникал между высотой приблизительно 3 и 8 м и радиусом 1 и 2 м. Зимой конвекционные потоки около стены возникали из свободного пространства и стекали вертикально до заполненного пространства. Конвекционные потоки через центр бункера возникали в заполненном пространстве и поднимались до свободного пространства.

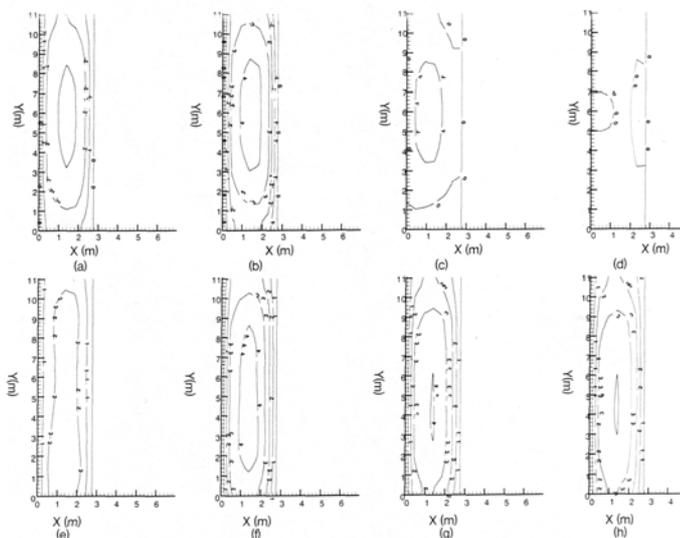




Рис.2. Графики функции течения в бункере с реальными границами на 1 января (а), 1 февраля (b), 1 марта (c), 1 апреля (d), 1 мая (e), 1 июня (f), 1 июля (g), 1 августа (h).

К Марту 1 (Рис. 2c) величина функции потока приблизилась к нулю. К Маю 1 (Рис. 2e) естественные конвекционные потоки начали разворачиваться и воздух поднимался вдоль стены и опускался около центра бункера из свободного пространства. Летом величина функции потока была немного выше в случае реалистичной границы, благодаря учету влияния солнечного излучения. Внутренняя часть бункера была сравнительно холодной, температурный перепад между стеной и центром бункера был более высоким, что приводило к немного большим конвекционным течениям.

Использование условий проницаемых границ должно привести к более реалистичным прогнозам температуры и влажности во время хранения. Когда естественным конвекционным потокам позволялось проходить через заполненное и незаполненное пространство, они значительно влияли на температуру и влажность. Поверхность зерна может стать непроницаемой из-за плесени или жизнедеятельности насекомых, которые могут привести к образованию корки на поверхности. В этом случае могли бы приниматься условия непроницаемых границ. Однако, при условии соответствующего хранения, поверхность зерна не покроется коркой и будет проницаемой для конвекционных потоков.

Температура и влажность во время хранения

Рис. 3 показывает 4 случая распределения температуры и влажности на протяжении года, при условии нереальной границы. 1 Апреля температура кукурузы во всем бункере упала до 5 °C и менее. Накопление влажности во время зимнего хранения не произошло (менее чем 0.1%). 1 Августа влажность в центральной верхней точке бункера возросла с 14 до 14.1% w.b. и зерно нагрелось до температуры между 11 и 23 °C. В районе центра заполненного пространства к этому времени также произошло небольшое понижение влажности (менее чем 0.1 %).

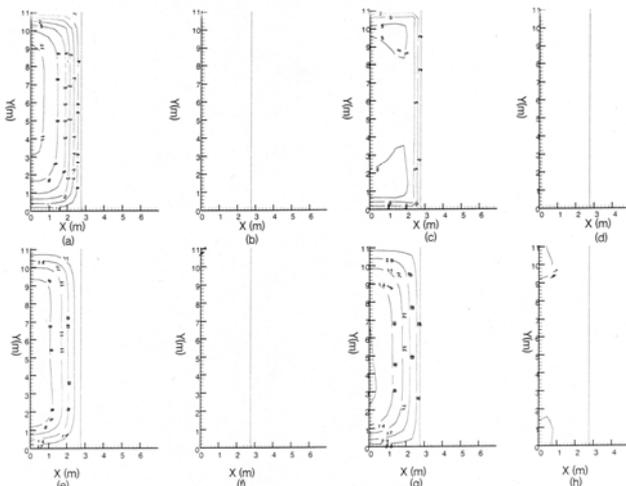


Рис.3. Графики температуры и влажности при условии проницаемости границ и поддержании температуры пустого, заполненного пространства и стены равной окружающей температуре на 1 февраля (a) и (e), 1 апреля (b) и (f), 1 июня (c) и (g) и 1 августа (d) и (h)

Это минимальное увеличение влажности в поверхностном слое не учитывает появления плесени, появление которой модель к настоящему времени не может предсказать. Предсказанное накопление влажности было значительно менее чем 1 %, предсказанный Khankari et al. (1995) для бункера в Миннеаполисе. Температурный перепад в радиальном направлении стал причиной естественного конвекционного потока. Khankari et al. (1995) имитировал бункер диаметром 10 m, который должен был иметь больший температурный перепад в радиальном направлении чем бункер диаметром 5 m. Бункер большего диаметра должен был иметь более сильные конвекционные потоки, которые должны приводить к большому накоплению влажности в свободном пространстве.

Рис. 4 показывает распределение температуры и влажности в бункере с условиями реалистичной границы. 1 Апреля температура кукурузы упала в пределах диапазона 8-11 °C. Приблизительно 0,1% влажности скопился в свободном пространстве. 1 Августа температура зерна колебалась между 17 и 29 °C, с максимальной величиной влажности приблизительно 14.5% в центре свободного пространства.

Два важных наблюдения сделаны при сравнении Рисунков 3 и 4. Первое: средние расчетные температуры в бункере были значительно выше при условии использования реалистичной границы. Солнечное излучение повысило среднюю температуру зерна на 4 °C. Если оценивать потери от изменений в качестве зерна, как например: порча вредителями, aflatoxin, плесенью или сухим гноем, различие в 4 °C должно иметь значимое влияние на прогнозирование качественных изменений.

Второе: величина влажности верхней части бункера, благодаря принятию условий проницаемой границы, увеличилась до более высокого уровня. Накопление влажности около свободного пространства было результатом естественных конвекционных течений, входящих в зерно из свободного пространства. Баланс содержания влажности (e.m.c.) потока был выше, чем у зерна. Средний e.m.c. свободного пространства между Октябрем и апрелем был 16.3%. В этих условиях естественные конвекционные течения, проходящие через поверхность зерна должны увеличивать влажность благодаря эффекту равновесия.



В заполненном пространстве влажность зерна уменьшалась немного, приблизительно на 0.1%. Во время зимних месяцев, естественные конвекционные потоки порождаются из заполненного пространства и поднимаются вдоль центральной оси бункера. Средний е.м.с. заполненного пространства за год составил 13.3%. Следовательно, естественные конвекционные потоки, возникающие из заполненного пространства, уменьшают влажность зерна вокруг заполненного пространства.

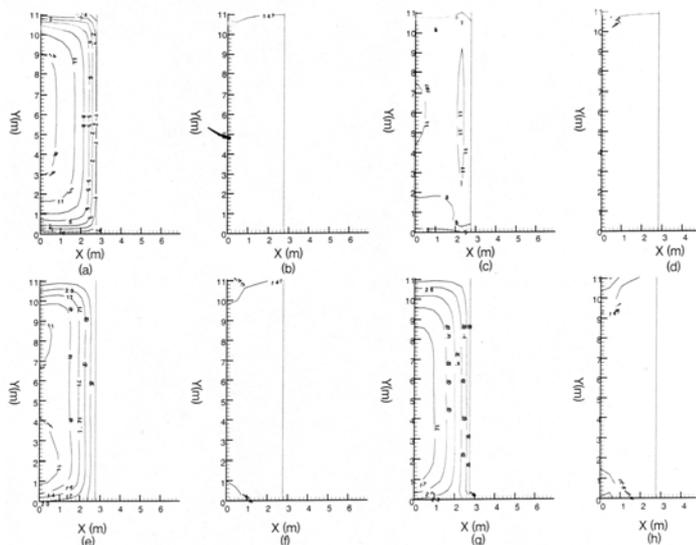


Рис.4. Графики температуры и влажности в бункере с реальными границами в на 1 февраля (а) и (е), (f), 1 июня (с) и (g) и 1 августа (d) и (h).

1 апреля (b) и

Допуская, что свободное пространство и поверхность зерна заполненного пространства - проницаемые, мы признаем, что е.м.с. и температура свободного и заполненного пространства играют важную роль в равновесии температуры и влажности во время хранения. На температуру и влажность заполненного и пустого пространства влияет множество переменных. Солнечное излучение, проникновение окружающего воздуха, скорость ветра и ее влияние на прогнозируемый коэффициент теплопередачи, величина естественных конвекционных потоков, проходящих через заполненное и незаполненное пространство и имеющих большое влияние на прогнозируемый е.м.с.. Наши данные указывают на то, что накопление или недостаток влажности в зерне в свободном и заполненном пространстве изначально является функцией эффекта равновесия с воздухом, имеющим более высокий или более низкий е.м.с. чем масса зерна. Течения естественной конвекции, возникающие из воздуха свободного пространства имели более высокий е.м.с. чем зерно для большинства периодов хранения и следовательно нужно ожидать увлажнения поверхности зерна. И наоборот, е.м.с. воздуха заполненного пространства был соответственно ниже е.м.с. зерна и следовательно стоило ожидать подсушивания зерна в заполненном пространстве.

Условия Конденсации в свободном пространстве

Модель также рассчитала условия конденсации в свободном пространстве. Общее количество времени прогнозируемое на возникновение конденсации составило 729 часов (8% времени). Допускалось, что вся конденсация произойдет на внутренней стороне крыши и конденсат не будет стекать в зерно. Всякий раз, когда относительная влажность свободного пространства уменьшалась после прогнозируемой конденсации, воде позволяли испаряться обратно в свободное пространство. В общей сложности из воздуха свободного пространства прогнозировалась конденсация 30.2 kg воды. Если этой влажности дать возможность сконденсироваться на высоте 0,3 м от зерна, то его средняя влажность возрастет на 0.5 %. [Нужно отметить, что во время тестов опытного бункера авторами, конденсация наблюдалась на поверхности зерна и изнанке крыши. Влага на поверхности зерна проникла на несколько сантиметров вглубь, не успев впитаться воздухом свободного пространства.] Это указывает, что конденсация могла значимо повлиять на накопление влажности в бункере, в случае если свободное пространство было неправильно вентилировано. В этом случае, если позволить влаге конденсироваться на высоте 0,3 м от зерна, то накопление влаги благодаря конденсации будет значительно больше, чем накопление влаги из-за естественной конвекции и диффузии. Итак, эти эффекты возможно объясняют большинство случаев спекания поверхности зерна, часто наблюдаемого менеджерами зернохранилищ.

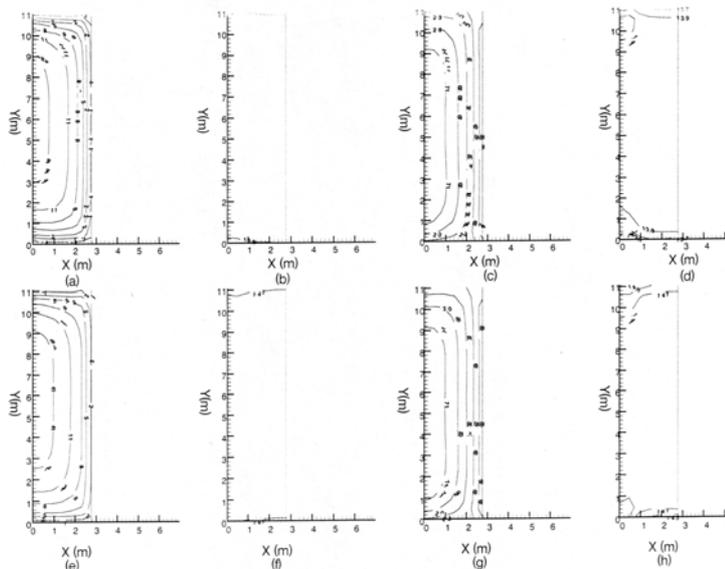


Рис.5. Графики температуры и влажности при постоянном балансе содержания влаги (е.м.с.) в 11 % в 1 февраля (а) и (е), 1 апреля (б) и (ф). Графики температуры и влажности с поддержанием постоянного баланса содержания влаги (е.м.с.) в 17 % в 1 февраля (с) и (г), 1 апреля (д) и (h).

Влияние состояния пустого и заполненного пространства

Моделирование использовало постоянный е.м.с. (11 и 17%) в свободном и заполненном пространстве, с температурой равной почасовой температуре окружающего воздуха. Солнечное излучение было учтено вдоль стены. Рис. 5 иллюстрирует влияние проницаемости границ свободного и заполненного пространства на прогнозируемое распределение температуры и влажности. При удержании температуры в свободном и заполненном пространстве равной окружающей температуре, зерно было немного холоднее окружающего воздуха (приблизительно 3°C), поскольку солнечное излучение не учитывалось. С фиксированным е.м.с. 11% в свободном и заполненном пространстве, влажность зерна около заполненного и пустого пространства уменьшилась (Рис. 5а и 5б). Небольшой район около центра поверхности зерна 1 Апреля имел легкое увеличение влажности (менее чем 0.08%). Увеличение влажности являлось следствием естественных конвекционных течений, во время зимы поднимающихся по центру бункера. Однако, только 1 Августа уровень влажности достиг 14,1%. Между 1 Апреля и 1 Августа влажность возросла на 0.04 % из-за диффузии или небольшого количества влаги, переносимого конвекционными течениями, входящими в поверхность зерна и опускающимися по оси бункера.

На Рис. 5с и 5д показано температуру и влажность в Феврале и Августе с фиксированным е.м.с. 17%. Влажность зерна около свободного и заполненного пространства возросла из-за высокого е.м.с. воздуха. Естественные конвекционные потоки возникли в заполненном и свободном пространстве и повысили содержание влаги в зерне. При прогнозировании потерь от сухого гноя или деятельности насекомых важно достоверно симитировать поверхность раздела между пустым и заполненным пространством.

Выводы

Из этого исследования перемещения и накопления влаги во время непрветриваемого хранения могут быть сделаны следующие выводы:

Расчет перемещения влаги с использованием условий реалистичной границы в бункере 5.5 m диаметром и 11 m высотой заканчивался минимальной суммой накопления влажности на поверхности зерна (менее чем 0.5 %).

Используя условия реальной границы была разработана более реалистичная теория баланса влажности, которая учитывает солнечное излучение, проницаемость поверхности зерна, конвекционный перенос тепла и массы на поверхность зерна и влияние ветра на передачу тепла через стены. При условии реалистичной границы накопление влажности происходит главным образом благодаря балансу с воздухом свободного и заполненного пространства конвекционными потоками

Модель предсказала значительную важность конденсации. Если позволить влажности конденсироваться на поверхности зерна, накопление влажности из-за конденсации было бы больше, чем накопление влажности из-за естественной конвекции и/или диффузии в пределах массы зерна.

В случае имитации реальных границ естественные конвекционные потоки вызывали небольшое циклическое течение в центре бункера. Тем не менее, в большинстве бункеров конвекционные потоки начинались и заканчивались в заполненном и пустом пространстве. Между Мартом и Маем конвекционные потоки меняли течение с зимнего на летнее направление. Естественные конвекционные потоки в Индиане имели зимнее направление в Декабре и Феврале, с Марта по Май проходил весенний период разворота, с Июня по Август потоки имели летнее направление, а с Сентября по Ноябрь проходил период осеннего разворота.



ССЫЛКИ

- Anon., 1993. Solar and Meteorological Surface Observation Network. (SAMSON). Asheville. N.C. National Climatic Data Center and National Renewable Energy Laboratory.
- Brooker D. B., Bakker-Arkema. F.W., Hall. L LW ., 1992 Drying and Storage of Grains and Oilseeds. Van Nostrand Remhold. New York.
- Casada M.E., Young. J.H., 1994. Heat and moisture transfer during transportation of shelled peanuts. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 37. 1939-1946.
- Griffith. H.J. 1964. Bulk Storage of Grain: a Summary of Factors Governing Control of Deterioration. Melbourne, Australia. CSIRO Division of Mechanical Engineering, Report EDS.
- Hellevang. K.J., Hirning. H. J., 1988. Moisture movement in stored grain during summer. American Society of Agricultural Engineers Paper No. 88-6052. St. Joseph, MI. ASAE.
- Khankari, K.K., Morey, R.V., Patankar. S.V., 1995. Application of a numerical model for prediction of moisture migration in stored gram. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 38. 1789-1804.
- Kreith, F. 1976. Principles of Heat Transfer. New York. N.Y.. Intext Educational Publishers.
- Maier. D. E. 1992. The Chilled Aeration and Storage of Cereal Grains. PhD Dissertation, Michigan State University. East Lansing. MI.
- Montross. M. D. 1999 Finite Element Modeling of Stored Gram Ecosystems and Alternative Pest Control Techniques. Unpublished Ph.D. Thesis. Purdue University. West Lafayette. IN.
- Montross. M. D., Maier. D.E., Haghghi. K., 2002a. Development of a new finite element stored grain ecosystem model. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (in press).
- Montross. M.D., Maier. D.E., Haghghi. K., 2002b. Validation of a new finite element stored grain ecosystem model. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (in press).
- Muir. W.E., Eraser, B.M., Smha. R.N., 1980. Simulation model of two-dimensional heat transfer in controlled-atmosphere grain bins. In: Shejbal, J. (Ed.). Controlled Atmosphere Storage of Grains. Elsevier Scientific Publishing. Amsterdam.
- Pierce. R.O., Shelton. D.P., 1984. Aeration of Stored Grain. NebGuide G84-692. Cooperative Extension Service. Lincoln. University of Nebraska.
- Ross, I.J., Hamilton, J.E., White. G. M., 1973. Principles of Grain Storage. Cooperative Extension Publication AEN-20. Lexington. University of Kentucky.
- Wilcke. W.F., Van Fossen. L.D., 1986. Managing Com in Long Term Storage. Cooperative Extension Publication AE-3021. Ames: Iowa State University.