

Никитин В.И., Прусел И.А., Кофанов В.А.

ОЦЕНКА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВЛАГОПЕРЕНОСА В ЗЕРНОВОЙ СРЕДЕ, ЗАПОЛНЯЮЩЕЙ СИЛОСЫ И СКЛАДЫ

ВВЕДЕНИЕ

При нормальных условиях хранения зерна злаковых культур в силосах и на складах (когда относительная влажность воздуха колеблется в диапазоне 40-90% и нет протечек воды) его влажность может изменяться в пределах 11-22% от массы сухого зерна. Эти колебания влажности зерна сопровождаются существенным изменением значений таких его физических свойств, как насыпная плотность, угол внутреннего трения, коэффициент трения о поверхности конструктивных материалов, модуль упругости зерновой среды и т.д. [1]. Значения этих свойств учитываются при проектировании технологических процессов, связанных с хранением и переработкой зерна, а также расчетах конструкций силосов. Следует отметить, что условия хранения зерна должны быть такими, чтобы его влажность находилась на уровне, не превышающем критической величины. Например, для зерна пшеницы и ржи критическая влажность составляет 14,5-15,5% [2]. Сверхкритическая влажность приводит к тому, что в зерне заметно интенсифицируются биохимические процессы. Результатом таких процессов может быть самосогревание зерновой среды до 60-80°C и увеличение ее объема из-за набухания зерна. При этом снижается качество хранимого зерна. Набухание и разогревание зерна при снижении температуры на наружной поверхности силоса может привести к появлению опасных растягивающих усилий в его железобетонной стенке.

Из сказанного следует, что при решении задач, связанных с хранением и переработкой зерна, важно оценивать его влажностное состояние при реальных условиях хранения. Такие оценки целесообразно получать расчетным путем с использованием математического описания и его компьютерной реализации, позволяющей имитировать сложные процессы переноса влаги в зерновой среде.

В работе приведены данные физического и вычислительного экспериментов, полученные при изучении процесса одномерного изотермического перемещения водяного пара в сосудах, заполненных зерном пшеницы. Выполнено сопоставление этих данных, которое показало, что разработанную математическую модель можно использовать для прогнозирования влажностного состояния зерна злаковых культур при хранении в силосах и на складах.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследование проводилось в лабораторных условиях с использованием зерна пшеницы. Сосуд, в который засыпалось зерно, изготавливался из пластмассовой трубы с внутренним диаметром 44 мм заданной длины. Один конец трубы герметически закрывался и в полученный сосуд до края засыпалось зерно пшеницы. Затем накладывалась сетка к которой прижималось пластмассовое кольцо такого же внутреннего диаметра и высотой 40 мм. Заполненный зерном сосуд, сетка и кольцо соединялись с помощью хомута. Герметичность соединения обеспечивалась резиновой прокладкой. Все вместе взятое рассматривалось в качестве экспериментальной единицы – образца. Подготовленный к испытаниям образец

взвешивался и подвешивался на штативе, и его открытый конец погружался в воду на глубину 2 см. Таким образом, между поверхностью воды и зерна находился замкнутый двухсантиметровый слой воздуха, относительная влажность которого достаточно быстро приближалась к 100%. На рис. 1 показана лабораторная установка и отдельный образец. В эксперименте использовались образцы трех типов (по три образца каждого вида), отличающихся друг от друга высотой столба зерна пшеницы: $h=50$ мм (образцы типа А), $h=100$ мм (тип В) и $h=150$ мм (тип С). Начальное содержание массы влаги в единице массы зерна, определенное весовым методом, составляло $u_0=0,11$ кг/кг (11%). Измеренное среднее арифметическое значение доли объема межзернового пространства в единице насыпного объема зерна равнялось 0,35.

В ходе эксперимента, который продолжался немного более восьми месяцев, в помещении поддерживалась довольно постоянная температура и влажность воздуха ($t=20^\circ\text{C}$, $\varphi=55\%$). Поэтому можно считать, что в образцах зерно пшеницы поглощало водяной пар, перемещающийся в межзерновом пространстве в изотермических условиях. Прирост массы образцов отслеживался дискретным весовым методом и измерялся с использованием электронных весов с точностью 0,01 г. В первые десять часов эксперимента измерение массы образцов проводилось через один час, на второй день через 6 часов, затем через 12 часов, а в последний месяц через 7 дней. Испытания образцов типа А (высота столба пшеницы $h=50$ мм) были прекращены через 77 дней, тогда как для образцов типа В и С это случилось через 247 дней. Такое решение принималось на основании анализа зависимости изменения массы образцов во времени.

После последнего взвешивания из образцов поочередно извлекались слои пшеницы (порции), толщина которых изменялась от 1 до 3 см. Для каждой такой порции зерна весовым методом определялось влагосодержание u . Результаты выполненных измерений (средние арифметические значения для трех образцов) представлены на рисунках 3 и 4 в виде точек, из которых видно, что процесс увлажнения зерна к моменту окончания эксперимента еще не закончился.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МЕЖЗЕРНОВОГО ПРОСТРАНСТВА НА ПРОЦЕСС ПЕРЕНОСА ВЛАГИ

Благодаря интенсивным исследованиям авторов работ [3, 4, 5] и многих других к настоящему времени сформировался достаточно научно-обоснованный уровень понимания физики сложных процессов переноса влаги в капиллярно-пористых строительных материалах. На основании этих представлений и с учетом геометрии зерен пшеницы, а также их способности через оболочку интенсивно поглощать внутрь себя парообразную и жидкую влагу, можно принять, что в межзерновом пространстве во всем рассматриваемом диапазоне изменение относительной влажности воздуха φ перемещающаяся влага будет представлена только парами воды.

Никитин Вадим Иванович, доктор технических наук, профессор Политехники Белостокской (Польша) и Брестского государственного технического университета.

Прусел Иоланта, кандидат технических наук, Политехники Белостокской (Польша).

Кофанов Валерий Анатольевич, аспирант каф. строительной механики Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

а)



б)

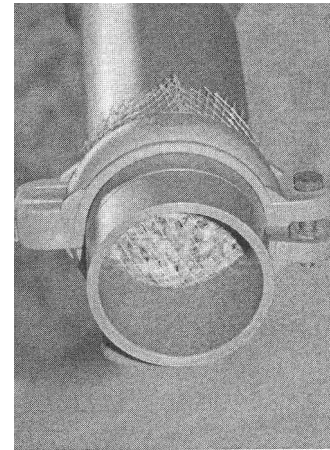


Рис. 1. Лабораторная установка для изучения процессов влагопереноса в зерновой среде (а); вид образца с зерном пшеницы (б).

При высоких значениях ϕ (около 70% и выше) в зоне контакта зерен возможна конденсация водяного пара. Следует отметить, что доля поверхности контакта в общей поверхности зерна очень мала, кроме того скорость увеличения влаги внутри зерна при его контакте с жидкой фазой на порядок выше, чем при контакте с насыщенным паром воздуха [2, 6]. Следовательно, накопление конденсата маловероятно и он не в состоянии существенно уменьшить эффективное сечение межзернового пространства.

В общем случае в полном потоке массы водяного пара, перемещающимся в межзерновом пространстве, можно выделить диффузную составляющую, вызванную градиентом парциального давления пара, и составляющую, вызванную градиентом давления влажного воздуха [7]. Для рассматриваемого в эксперименте случая вторая составляющая практически будет отсутствовать.

Диффузную составляющую потока водяного пара в межзерновом пространстве можно описать первым законом Фика в виде:

$$q = \delta_p \cdot \text{grad } p, \quad (1)$$

где δ_p – коэффициент переноса водяного пара в межзерновом пространстве, кг/(м·с·Па);

p – парциальное давление водяного пара, Па.

При определении коэффициента переноса водяного пара в межзерновом пространстве воспользуемся соотношением

$$\delta_p = f_s \cdot \delta_0, \quad (2)$$

где δ_0 – коэффициент переноса водяного пара в воздухе;

f_s – коэффициент структуры, учитывающий влияние структурных параметров межзернового пространства.

Формулы вида (2) для определения коэффициентов переноса водяного пара в пористых материалах давно и весьма широко известны, например [3, 7, 8 и др.].

Для определения коэффициента структуры можно использовать зависимость [9]

$$f_s = \left\{ \frac{1}{2} + \sin \left[\frac{\arcsin(2 \cdot P - 1)}{3} \right] \right\}^2, \quad (3)$$

где P – доля объема межзернового пространства в единице насыпного объема зерна.

Соотношение (3) получено исходя и того, что между процессами переноса тепла и газа существует полная аналогия [4, 10].

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ПЕРЕНОСА ВОДЯНОГО ПАРА В ЗЕРНЕ

С некоторым приближением можно считать, что в лабораторном эксперименте в зерновой среде образцов имеет место нестационарное одномерное изометрическое перемещение водяного пара в межзерновом пространстве. В процессе этого перемещения массовое влагосодержание в единице массы зерна изменяется в зависимости от значений пространственной x и временной t координат $u = u(x, t)$.

Процесс одномерного нестационарного изотермического перемещения водяного пара в межзерновом пространстве описывается уравнением вида [3, 10], представляющим закон сохранения массы,

$$\rho_0 \cdot \xi \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta_p \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right), \quad (4)$$

где ρ_0 – насыпная плотность сухого зерна, кг/м³;

ξ – удельная пароемкость зерна, т.е. масса водяного пара, которая необходима для повышения парциального давления пара в единице массы зерна на 1 Па.

Удельная пароемкость определяется по формуле

$$\xi = \frac{1}{p_s} \frac{du}{d\phi}, \quad (5)$$

где p_s – парциальное давление водяного пара в состоянии насыщения, Па;

$\phi = p/p_s$ – относительная влажность воздуха.

При вычислении производной $\frac{du}{d\phi}$ использована изотерма сорбции, которая для зерна пшеницы имеет вид, приведенный на рис. 2.

Чтобы решить уравнение (4), необходимо принять соответствующие начальные и граничные условия на поверхностях зерна. Начальное условие означает, что столб пшеницы высотой h в начальный момент времени ($t=0$) имеет начальную влажность u_0

$$u(x, 0) = u_0, \quad 0 \leq x \leq h \quad \text{и} \quad t = 0. \quad (6)$$

На верхней (закрытой) поверхности зерна перемещение пара отсутствует и, следовательно, вектор плотности потока пара равен нулю

$$q(x, 0) = 0, \quad x = h \quad \text{и} \quad t \geq 0. \quad (7)$$

Относительная влажность воздуха на границе с открытой нижней поверхностью зерна постоянна и равна 0,97.

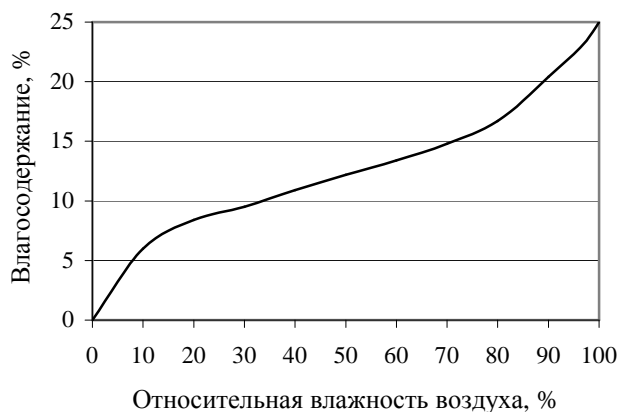


Рис. 2. Изотерма сорбции для зерна пшеницы [2].

$$\varphi(x, t) = 0,97, \quad x \leq 0 \quad \text{и} \quad t \geq 0. \quad (8)$$

Значение Φ принято несколько меньше единицы с учетом дискретного метода взвешивания массы образца.

На основе математического описания (4), (5), (6), (7) и (8) можно определить неизвестные функции $p(x, t)$ и $u(x, t)$. При известной функции $u(x, t)$ удастся проследить изменение массы зерна в процессе изотермического увлажнения

$$\Delta m = m(t) - m_0 = \rho_0 \cdot A \cdot \int_0^h (u - u_0) dx, \quad (9)$$

где m_0 и $m(t)$ – масса зерна в момент времени $t=0$ и $t>0$ соответственно;

A – площадь поперечного сечения столба зерна, заполняющего сосуд.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ЕГО АНАЛИЗ

Процесс изотермического увлажнения образцов с зерном, рассмотренный в лабораторном эксперименте и описанный математически (1) - (9), был проимитирован на компьютере с

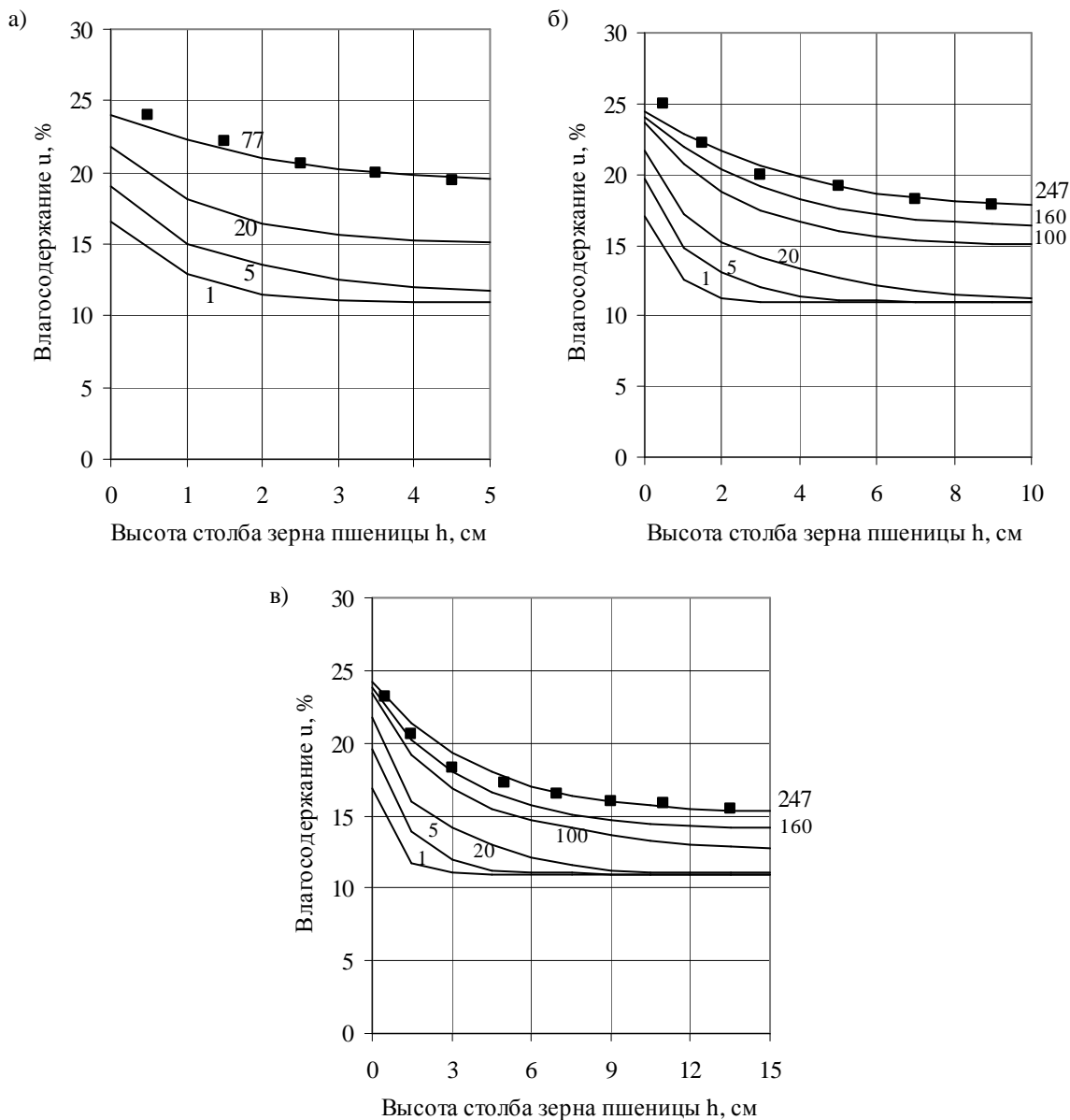


Рис. 3. Изотерма влагосодержания образцов зерна пшеницы в зависимости от пространственной x и временной t координат: (а) тип А – $h=5$ см; (б) тип В – $h=10$ см; (в) тип С – $h=15$ см.

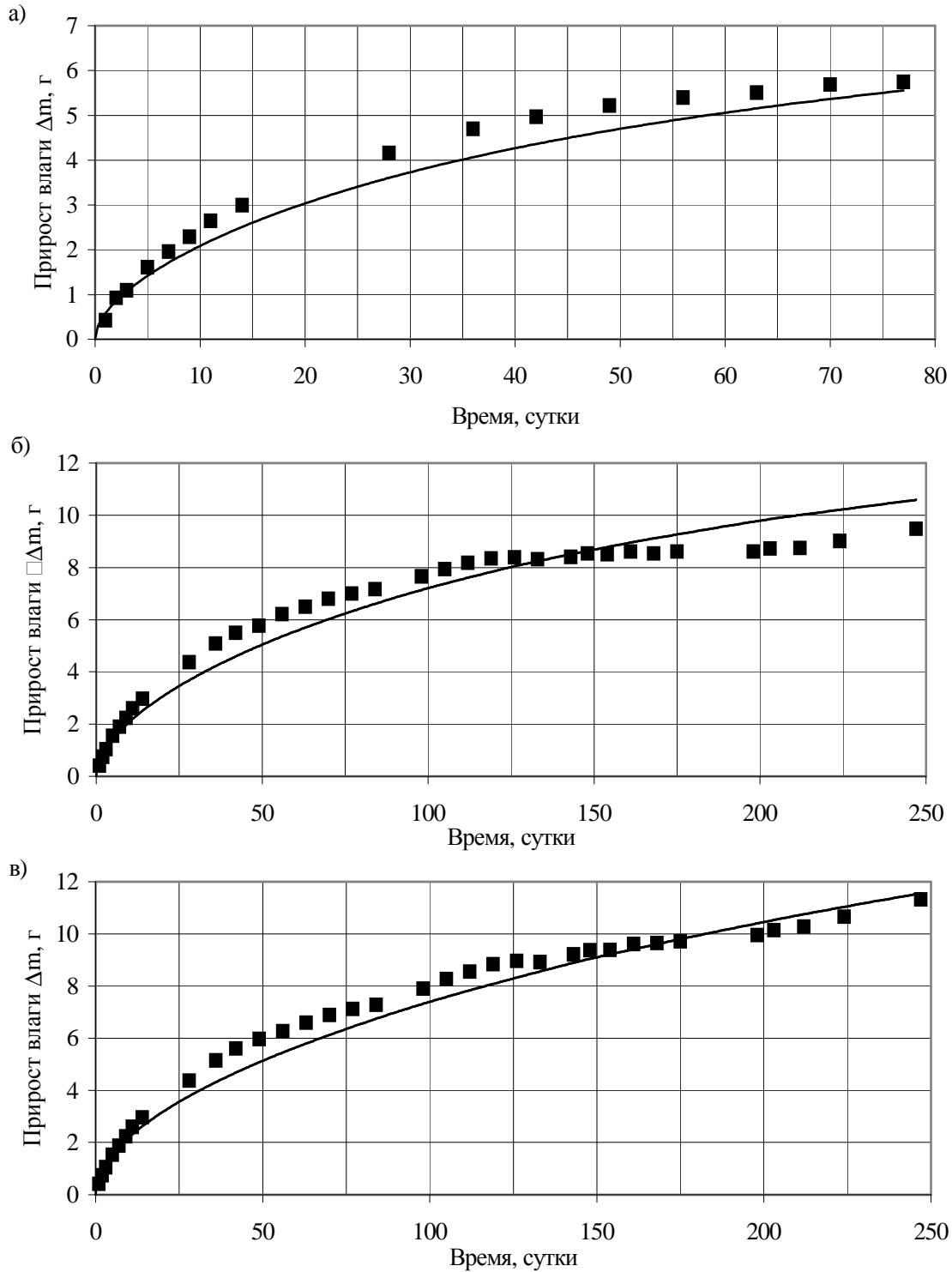


Рис. 4. Прирост массы образцов типа А, В, С во времени – сравнение опытных данных (точки) и вычислений с помощью математической модели.

помощью программы, разработанной авторами [11]. При проведении вычислительного эксперимента коэффициент теплопроводности λ (Вт/м·К) и удельная теплоемкость c (кДж/кг·К) зерна пшеницы определялось с учетом ее влагосодержания по формулам, аппроксимирующим данные работ [2, 6]

$$\lambda = 0,07 + 0,0023 \cdot u ,$$

$$c = 1,047 + 0,042 \cdot u ,$$

где влагосодержание u в %.

Принято, что на открытой поверхности зерна ($x=0$) сопротивление паропроонианию $R_e=13,3 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па} / \text{г}$, а коэффициент теплоотдачи $\alpha_e=23 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{с}$. Коэффициент диффузии (переноса) пара в воздухе как и в [4] принят равным $\delta_0=6,23 \cdot 10^{-4} \text{ г} / \text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па}$. Считается, что определенная экспериментально доля объема межзернового пространства в единице насыпного объема зерна $P=0,35$ в процессе изотермического увлажнения не меняется. При таком значении P коэффициент структуры межзернового пространства, вычисленный по формуле (3), равен $f_S=0,158$. Тогда коэффициент переноса водяного пара в межзерновом

пространстве, найденный из соотношения (2), принимает значение $\delta_p = 0,98 \cdot 10^{-4}$ г/м·ч·Па.

Результаты вычислений, полученные при таких исходных данных, показаны на рисунках 3 и 4.

Из рис. 3 видно, что распределение влаги по высоте столба зерна $h=5, 10$ и 15 см, установленное в результате лабораторного эксперимента и с помощью компьютерной имитации к моменту окончания процесса изотермического увлажнения ($t=77$ дней для образцов типа А и $t=247$ дней для образцов типа В и С) практически совпадают. На этой основе можно утверждать, что и для других моментов времени указанное распределение влаги, найденное с помощью компьютерного моделирования, не будет существенно отличаться от действительного. Следовательно, с практической точки зрения функция $u(x,t)$ определяется достаточно точно.

Из рисунка 4 видно, что значения изменения массы зерна в процессе его изотермического увлажнения для всех типов образцов при одномерном потоке водяного пара, найденные в лабораторном эксперименте и вычисленные по формуле (9), не отличаются существенно друг от друга. Некоторые отклонения расчетных кривых от опытных данных можно объяснить незначительными колебаниями температуры воздуха в лаборатории, а также погрешностями, которые могли возникнуть при задании значений исходных параметров, использованных при расчете. Как правило, эти параметры имеют случайный характер и их значения могут колебаться довольно в широком диапазоне. Как показали вычислительные эксперименты путем небольшого (до 10%) изменения значений таких параметров, как сопротивление паропрооницанию R_e , коэффициент диффузии водяного пара в воздухе δ_0 , относительный объем межзернового пространства в единице насыпного объема зерна P можно добиться более точного предсказания опытных данных.

Из рис. 3 и 4 следует, что во всех случаях (образцы типа А, В, С) процесс изотермического увлажнения не завершен. Равновесного состояния достиг лишь нижний слой зерна толщиной примерно 1 см, имеющий открытую поверхность. Потребуется еще не мало времени для того, чтобы по всей высоте столба зерна h была одинаковая влажность, соответствующая относительной влажности воздуха $\phi=0,97$. Анализ кривых $u(x,t)$ на рисунке 3 показывает, что значение влагосодержания образцов типа А по всей высоте зерна $h=5$ см превысят критическую величину ($u_{кр}=15\%$) после 20 дней увлажнения, при $h=10$ см после 100 дней, а при $h=15$ см после 247 дней. В наружном слое толщиной 1 см это произойдет уже к концу первых суток. Такого рода информация может быть использована при разработке рекомендаций по хранению и переработке зерна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненного исследования свидетельствуют о том, что в нормальных условиях хранения зерна злаковых

УДК 624.131

Лях Ю.В.

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ТИПЫ ФУНДАМЕНТОВ НА УПЛОТНЕННЫХ ПЕСЧАНО-ГРАВИЙНЫХ ПОДУШКАХ

Одной из актуальных проблем в области строительства является снижение материалоемкости строительных конструкций, в том числе конструкций фундаментов, на основе использования в качестве оснований искусственно подготовленных песчано-гравийных подушек, обладающих большой несущей способностью и малой деформируемостью. Очевидно, что при наличии весьма прочных оснований представля-

ется возможным использовать в качестве фундаментов узкие подушки. Их применение позволяет улучшить условия работы фундамента, а следовательно, снизить расход бетона и арматуры. Нами были выполнены исследования, позволившие установить рациональную область применения узких сборных ленточных фундаментов на уплотненных песчано-гравийных подушках.

Предложенная математическая модель может быть использована для оценки влажностного состояния зерна злаковых культур, хранимого в силосах и на складах, при этом исходные параметры, необходимые при выполнении компьютерного моделирования следует принимать с учетом реальных условий.

Работа выполнена в рамках договора о сотрудничестве между Политехникой Белостокой и Брестским государственным техническим университетом, а также темой № W/ПВ/5/04, финансируемой КВН.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Horabik J., Molenda M. Właściwości fizyczne sypkich surowców spożywczych istotne w procesach magazynowania i przetwarzania. Wydział XII Konferencji Naukowo-Technicznej "Żelbetowe i sprzężone zbitniki na materiały sypkie i ciecze". – Kraków, 2003. – S. 89-96.
2. Казаков Е.Д., Кретович В.Л. Биохимия зерна и продуктов его переработки. – М.: Агропромиздат, 1989. – 368 с.
3. Лыков А.В. Тепломассообмен. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
4. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
5. Wygwał J., Świrski J. Problemy zawilgocenia przegród budowlanych. Studia z zakresu inżynierii, №44, PAN KILiW IPPT. – Warszawa, 1998. – 109 s.
6. Лебедев В.Б. Промышленная обработка и хранение смеси. – М.: Агропромиздат, 1991. – 255 с.
7. Gawin D. Modelowanie sprzężonych zjawisk cieplno-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych. Zeszyty Naukowe nr. 853, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. – Łódź, 2000. – 303 s.
8. Афонин А.В., Никитин В.И. Вычисление паропрооницаемости капиллярно-пористых материалов с учетом течения сорбционных пленок // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2003. – №1(19). – С. 34-40.
9. Афонин А.В. Расчет паропрооницаемости пористых материалов методом аналогии. Материалы Международной научно-практической конференции «Напрягающие цемента, бетоны и самонапряженные конструкции». – Брест, 2000. – С. 151-155.
10. Лыков А.В. Теоретические основы строительной теплофизики. – Мн.: Изд-во АН БССР, 1961. – 520 с.
11. Никитин В.И., Ракецкий В.М., Лапко А., Прусел И.А. Имитация тепло- и влагопереноса в теплоизоляционных материалах // Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – 2001. – №2(8). – С. 56-60.