УДК 621.6.023

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ВЛАЖНОСТНОЕ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СТЕН ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СИЛОСОВ

д-р техн. наук, проф. В.И. НИКИТИН, В.А. КОФАНОВ
(Брестский государственный технический университет)

Исследуется влияние климатических воздействий на влажностное и напряженное состояние стен железобетонных силосов. С помощью вычислительного эксперимента установлено, что в поверхностных слоях бетона стенок цилиндрических силосов для хранения зерна злаковых культур от климатических воздействий рассмотренного года (температуры и влажности воздуха, а также атмосферных осадков в виде дождя) возникают знакопеременные температурно-влажностные напряжения, амплитуда которых во время дождей возрастает в несколько раз. При этом значения вычисленных сжимающих и растягивающих напряжений могут значительно превышать их граничные значения для рассматриваемого класса бетона. В результате быстро повреждается структура бетона, образуются микротрещины и интенсифицируются процессы переноса влаги. При реализации вычислительного эксперимента необходимо было оперировать непрерывными данными, поэтому дискретные данные о температуре и относительной влажности воздуха были аппроксимированы сплайн-функциями.

Введение. Стены железобетонных силосов для хранения зерна злаковых культур подвергаются интенсивным тепловым и влажностным воздействиям окружающей среды, вызывающим перепады температуры и влажности по толщине стены и зерна. Вследствие этих перепадов в стенах силосов возникают переменные температурно-влажностные деформации и напряжения, приводящие к быстрому появлению и накоплению трещин, уменьшающих способность бетона выполнять требуемые функции, в том числе способность защищать хранящееся зерно от переувлажнения. В результате зерно набухает, теряет свое качество и оказывает дополнительное давление на стены силосов. Отрицательные последствия повышения влажности зерна для силосов отмечаются, например, в работах [1, 2]. При анализе влажностного состояния стен из капиллярно-пористых материалов климатические воздействия обычно характеризуются только температурой и влажностью окружающего воздуха. Как показано в работе [3], на влажностное и напряженное состояние стены из ячеистого бетона наряду с температурой и влажностью окружающего воздуха существенное влияние оказывают атмосферные осадки в виде дождя.

Представляет интерес оценить эффекты совместного воздействия этих трех факторов для стен силосов, заполненных зерном. В данной статье такая оценка выполнена путем вычислительного эксперимента с помощью разработанных нами моделей [3 – 5], описывающих процессы переноса тепла и влаги в капиллярно-пористых материалах и зерновых средах под воздействием указанных климатических факторов. В расчетах были использованы данные метеорологических наблюдений на территории города Бреста.

Исходные данные для расчета. В вычислительном эксперименте рассматривались цилиндрические железобетонные силосы, заполненные зерном пшеницы. Внутренний диаметр силосов – 10 м, стены имели толщину 0,2 и 0,3 м. Толщина стены разбивалась на 11 элементарных слоев. Коэффициент теплоотдачи и сопротивление влагообмену на наружной поверхности стены были приняты соответственно равными: α_e = 23 Вт/(м^2·с) и R_e = 13,3 м^2·ч·Па/г [6].

Необходимые для выполнения расчетов значения основных свойств бетона и зерновой среды получены путем обобщения данных работ [6 – 9] и представлены в таблице 1, где u – масса влаги в единице массы материала, %.

Таблица 1

Принятые значения свойств бетона и органической зерновой среды

Свойство и его обозначение	Размерность	Бетон	Зерно пшеницы
Теплопроводность, λ	Вт/(м·К)	1,5 + 0,06u	0,07 + 0,0023u
Теплоемкость, c	кДж/(кг·К)	0,84 + 0,042u	1,047 + 0,042u
Коэффициент паропроницания, δ_p	г/(м·ч·Па)	$0{,}30\cdot10^{-4}$	$0{,}98\cdot10^{-4}$
Плотность, ρ	кг/м^3	2300	750

Кроме того, в соответствии с нормой PN-B-03264:2002 [10] для бетона было принято: среднее значение модуля упругости E = 31 ГПа; коэффициента Пуассона ν = 0,2; коэффициента линейного темпера-

турного расширения $\alpha = 1 \cdot 10^{-5}$ °C^{-1}. Коэффициент линейного расширения (β) под воздействием влаги принят равным $3 \cdot 10^{-4}$ 1/%. На основании анализа данных работ [11, 12] коэффициент сорбции воды (A) для бетона в начальный момент эксплуатации силоса может быть принят равным 0,02 кг/(м^2·с^{0,5}). При этом максимальное влагосодержание бетона (w_c) в результате капиллярного впитывания воды принято равным 160 кг/м^3 (u_m = 7 %). В процессе последующей эксплуатации силоса происходит деградация бетона (интенсивнее всего в наружных поверхностных слоях), которая приводит к существенному увеличению значения коэффициента сорбции воды и открытой пористости. Поэтому для оценки эффекта деградации бетона в расчетах использовалось увеличенное значение коэффициента сорбции воды A = 0,04 кг/(м^2·с^{0,5}) и максимального влагосодержания при капиллярном впитывании воды w_c = 180 кг/м^3 (u_m = 7,8 %). Предполагалось, что если влажность воздуха (φ) в порах бетона не превышает 80 %, то перенос влаги осуществляется в виде водяного пара при постоянном значении коэффициента паропроницаемости (δ_p) (см. табл. 1). При φ > 80 % происходит капиллярная конденсация пара и перенос влаги (в основном связан с капиллярным переносом жидкости). Расчет процесса капиллярного переноса жидкости выполнялся с использованием коэффициента выравнивания влаги D_w, который определялся с использованием формулы, рекомендованной в работе [7]:

$$D_w = 3{,}8 \cdot \left(\frac{A}{w_c} \right)^2 \cdot 1000^{\left(\frac{w}{w_c} - 1 \right)},$$

где w – масса воды, содержащаяся в единице объема материала ($0 < w \le w_c$).

Для рассматриваемой зерновой среды нами установлено [9], что изотермический процесс переноса влаги в нормальных условиях хранения зерна (0 < φ ≤ 100 %) осуществляется в основном в виде водяного пара при постоянном значении коэффициента паропроницаемости (см. табл. 1). Используемые в расчетах процесса влагопереноса изотермы сорбции материалов показаны на рисунке 1.

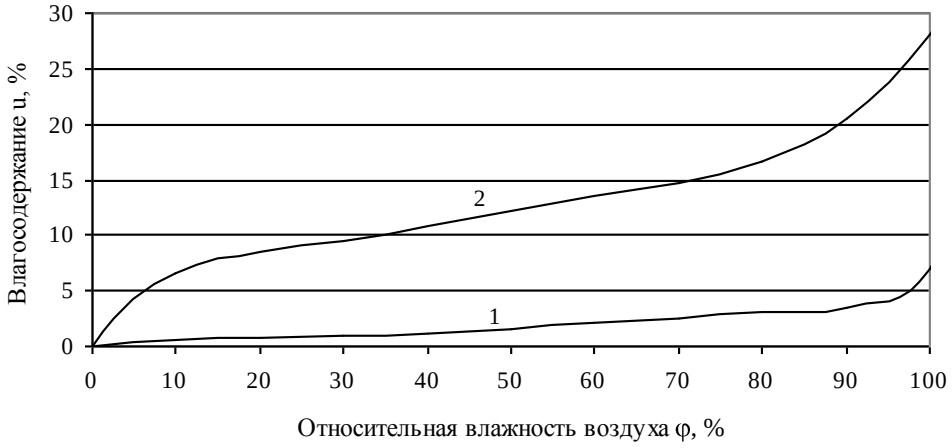

Рис. 1. Изотермы сорбции для бетона (1) и зерна (2)

При описании рассматриваемых воздействий окружающей среды использовались интернет-данные гидрометеоцентра для города Бреста за 2003 год, согласно которым температура и относительная влажность воздуха отслеживались через каждые три часа, а атмосферные осадки характеризовались их среднесуточным количеством и продолжительностью с указанием времени суток (ночь, утро, день, вечер).

При реализации вычислительного эксперимента необходимо было оперировать непрерывными данными. Поэтому дискретные данные о температуре и относительной влажности воздуха были аппроксимированы сплайн-функциями. На рисунке 2, а показаны результаты этой аппроксимации для июля, в котором амплитуда колебаний температуры и относительной влажности воздуха оказались наибольшими по сравнению с другими месяцами года. Среднесуточное количество атмосферных осадков при выполнении расчетов распределялось между временами суток поровну. В результате, например, распределение количества атмосферных осадков для июля, оказавшегося в числе трех наиболее дождливых месяцев, выглядело так, как показано на рисунке 2, б.

Расчеты температурно-влажностного состояния и связанного с ним напряженно-деформационного состояния бетонной стенки силоса, заполненного зерном пшеницы, были выполнены на отрезке одного года от начала июля месяца. При этом полагалось, что в начальный момент времени температуры бетон-

ной стенки силоса и зерна были постоянными и составляли 20 °С, а влажность (u) соответствовала равновесной, определенной по изотерме сорбции (см. рис. 1) при относительной влажности воздуха φ = 70 % для бетона (примерное среднемесячное значение φ в июле) и φ = 50 % для зерновой массы пшеницы. Тогда для бетона имеем u = 2,55 %, а для зерна u = 12,2 %.

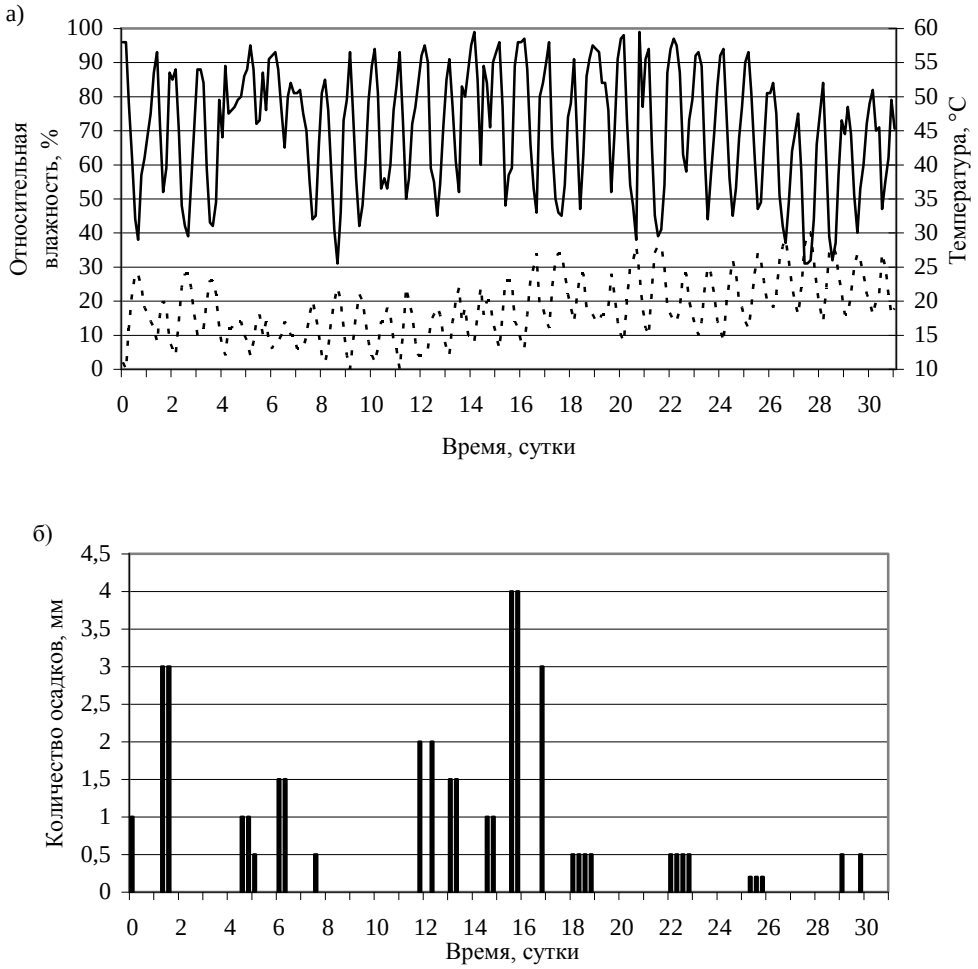

Рис. 2. Климатические условия для июля:
а – изменение температуры (---) и относительной влажности (——) воздуха;
б – изменение количества осадков в виде дождя

Результаты расчетов и их анализ. На рисунке 3 показаны результаты вычислительного эксперимента, отражающие изменения во времени значений влагосодержания (u) и тангенциальных напряжений (σ_θ) в наружном и внутреннем (на глубине 4 см) элементарных слоях стенки силоса, имеющей толщину t = 0,2 м и коэффициент сорбции воды для бетона A = 0,02 кг/(м^2·с^{0,5}), от климатических воздействий (см. рис. 2). Из этого рисунка нетрудно заметить, что в указанных элементарных слоях стенки напряжения имеют знакопеременный характер и в определенной мере повторяют колебания влагосодержания тех же слоев. При переходе от наружного слоя к внутреннему амплитуды колебаний рассматриваемых параметров u и σ_θ уменьшились в несколько раз, что свидетельствует о быстром затухании колебаний этих показателей в стенке силоса по мере удаления от ее наружной поверхности.

При сопоставлении рисунков 2 и 3 видно, что во время дождей наружный слой бетонной стенки может увеличить свое влагосодержание вплоть до максимального значения: u_m = 7 %, что приводит к появлению в нем значительных сжимающих напряжений. Так, во время дождя на вторые сутки июля влагосодержание в наружном слое бетонной стенки повысилось до состояния капиллярного водонасыщения u_m = 7 %, а вычисленные сжимающие напряжения при этом достигли 36 МПа, что превысило расчетную величину для рассматриваемого класса бетона В30 [10]. В случае увеличения интенсивности и продолжительности дождя бетонная стенка увлажняется на большую глубину и, соответственно, на большую глубину распространяются сжимающие напряжения. При высыхании увлажненного поверхно-

стного слоя стенки (интенсивнее всего этот процесс протекает в солнечную погоду) в нем возникают условные растягивающие напряжения, значения которых во много раз превышают допустимые расчетные напряжения при растяжении. При чередовании таких сжимающих и растягивающих напряжений поверхностный слой бетонной стенки силоса быстро покрывается сеткой микротрещин, которые со временем могут распространиться на значительную глубину. Следует отметить, что при отсутствии дождей амплитуда колебаний влажности и напряжений в поверхностном слое бетона уменьшается в несколько раз.

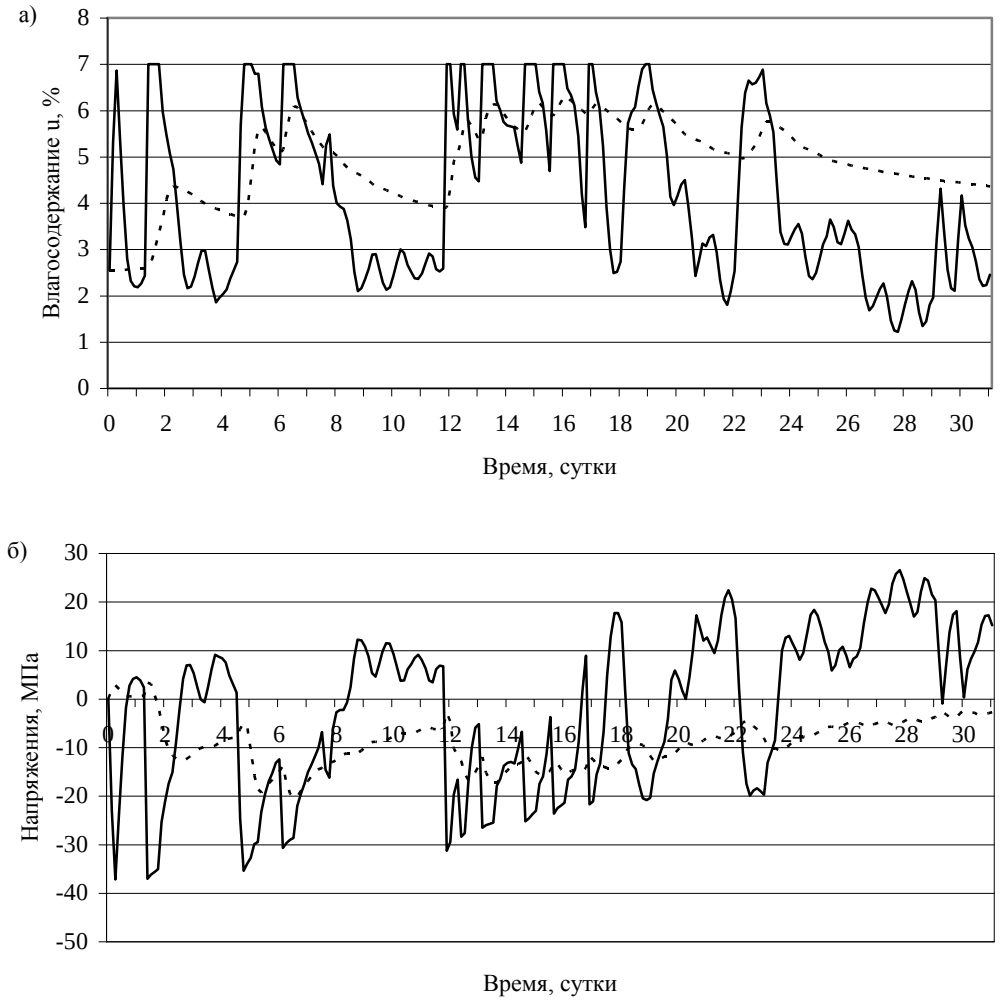

Рис. 3. Изменение содержания влаги (а)
и тангенциальных напряжений (б) в элементарных слоях стены:
на наружной поверхности (——); на глубине 4 см (---)

Расчеты показали, что увеличение толщины бетонной стенки силоса с 0,2 до 0,3 м при коэффициенте сорбции воды A = 0,02 кг/(м^2·с^{0,5}) практически не изменило количественное описание влагосодержания и напряжений, показанного на рисунке 3. При увеличении коэффициента сорбции воды с 0,02 до 0,04 кг/(м^2·с^{0,5}) глубина капиллярного впитывания дождевой влаги в бетонную стенку силоса возрастает, уменьшаются градиенты влагосодержания и, соответственно, значения сжимающих напряжений в рассматриваемых слоях.

На рисунке 4 показан процесс изменения влагосодержания контактирующих друг с другом в течение одного года элементарных слоев зерна пшеницы и стенки силоса, бетон которой имел коэффициент сорбции воды, равный 0,02 кг/(м^2·с^{0,5}). Здесь наблюдается одинаковый характер изменения во времени влагосодержания в приконтактных слоях стенки силоса и зерна, так как при расчетах принято, что в любой момент времени оба материала находятся в состоянии термодинамического равновесия, при котором их потенциалы переноса массы одинаковы.

При рассмотрении кривых, представленных на рисунке 4, можно выделить три последовательных периода, отличающихся уровнем влагосодержания слоев и продолжительностью. На первом временном отрезке влажность приконтактных слоев практически не меняется и близка начальному значению. Как известно [8, 13], условия хранения зерна должны быть такими, чтобы его влажность не превышала критической величины, которая для зерна пшеницы и ржи составляет 15 ± 0,5 %. Превышение этой границы ускоряет нежелательные биохимические процессы в зерне, которые ухудшают его качество. Исходя из этого влажность элементарного приконтактного слоя зерна, хранимого в силосе с толщиной стенки 0,2 м, превысит указанную критическую границу примерно через 100 дней (в первой половине октября). В силосе с толщиной стенки 0,3 м это произойдет примерно через 125 дней (в начале ноября). Продолжительность первого периода и, следовательно, продолжительность безопасного хранения зерна можно увеличить, если перед загрузкой зерна подсушить бетонную стенку силоса. Расчеты показали, что при снижении начальной влажности бетона с 2,55 до 1,60 % (при этом в соответствии с изотермой сорбции относительная влажность воздуха в порах бетона снижается с 70 до 50 %) продолжительность безопасного хранения зерна для силоса с толщиной стенки 0,3 м растягивается почти на год и составляет примерно 340 дней.

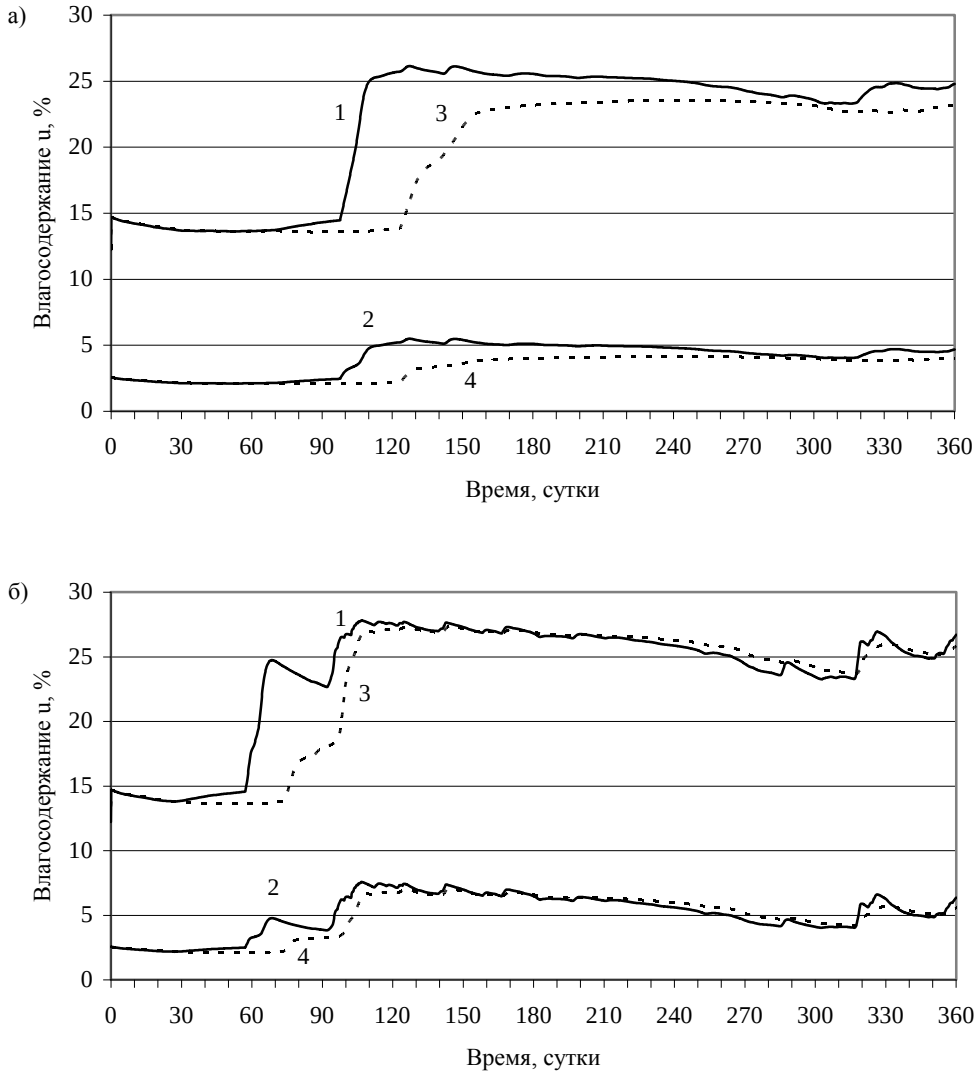

Рис. 4. Изменение влагосодержания в элементарных слоях бетона (2, 4) и зерна (1, 3) в зоне контакта для A = 0,02 кг/(м^2·с^{0,5}) (а) и A = 0,04 кг/(м^2·с^{0,5}) (б) при толщине стены 0,2 м (1, 2) и 0,3 м (3, 4)

Следующий период отличается от первого быстрым увеличением влагосодержания контактирующих слоев, а его продолжительность увеличивается с ростом толщины стенки силоса. Если при толщине стенки силоса 0,2 м процесс быстрого увлажнения контактирующих слоев завершается примерно за десять дней октября, то при толщине стенки 0,3 м он растягивается почти на весь месяц.

Третий период характеризуется довольно стабильными значениями влагосодержания контактирующих слоев. При этом влажность приконтактного слоя зерна превышает критическое значение (u = 15 %) на 8…11 %. Со временем в закритическое влажностное состояние переходят все новые и новые элементарные слои зерна.

Для сравнения аналогичный вычислительный эксперимент был выполнен для случая, когда бетон стенки силоса характеризовался большим коэффициентом сорбции воды A = 0,04 кг/(м^2·с^{0,5}) и являлся более проницаемым для влаги. Выяснилось, что с повышением значения коэффициента A в два раза переувлажнение приконтактного слоя зерна ($u \geq 15$ %), хранимого в силосах с толщиной стенки 0,2 и 0,3 м, наступает почти в два раза быстрее (продолжительность первого периода составляла соответственно 55 и 75 дней), чем при A = 0,02 кг/(м^2·с^{0,5}). При этом кривые, отслеживающие влагосодержание контактирующих слоев зерна и бетона во времени, отличались большей изменчивостью. Поскольку продолжительность хранения зерна при полной загрузке силоса даже на предприятиях с высокой оборачиваемостью зерна может достигать 4-х месяцев [14], то стенка силоса, выполненная из бетона с коэффициентом сорбции воды A = 0,04 кг/(м^2·с^{0,5}), не может надежно защищать зерно от переувлажнения даже на начальном периоде эксплуатации.

На рисунке 5 показано распределение влаги по толщине стенки и зерновой среды после одного года эксплуатации силоса, выполненного из бетона с коэффициентом сорбции воды, равным 0,02 кг/(м^2·с^{0,5}); u_0 – начальное и u_m – максимальное влагосодержание бетона и зерна.

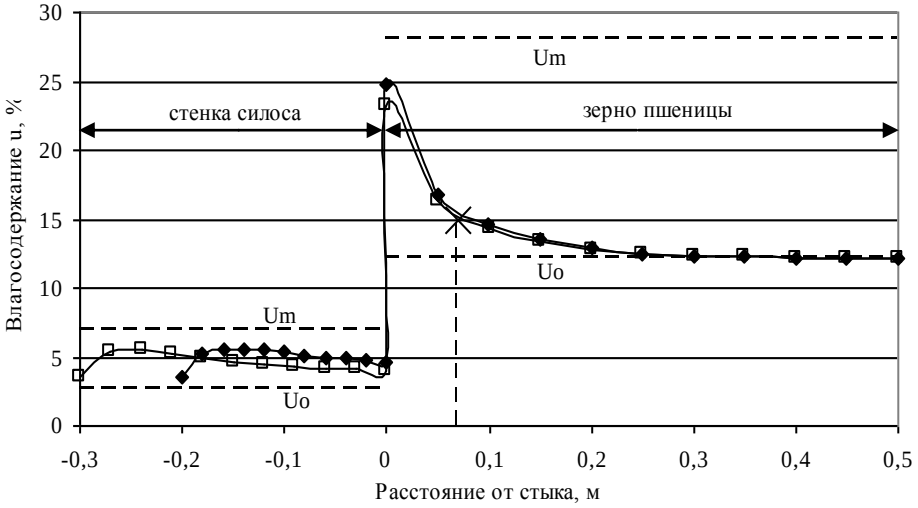

Рис. 5. Распределение влаги в стене силоса толщиной 0,2 м (♦), 0,3 м (■) и пристенном слое зерна

Как видно из рисунка, после года эксплуатации силоса, заполненного зерном, как бетон стенки, так и зерно повысили свое влагосодержание весьма неравномерно. В стенке силоса повышение влагосодержания произошло фактически во всех элементарных слоях бетона. При этом наибольшее приращение влаги имеет место в слоях, расположенных на расстоянии примерно одной четверти толщины стенки от ее наружной поверхности. Влагосодержание бетона в этих слоях находится на уровне 6 % и немного не достигает максимального уровня: u_m = 7 %. В зерновой среде повышение влагосодержания произошло только в приконтактных слоях на глубину примерно 20 см от внутренней поверхности стенки силоса. При этом в слое зерна толщиной около 8 см значение влагосодержания превысило критическую величину u = 15 %, что для цилиндрического силоса с внутренним диаметром 10 м составляет 3,2 % от объема хранимого зерна.

Расчеты, выполненные для силоса, имеющего бетон с коэффициентом сорбции воды 0,04 кг/(м^2·с^{0,5}), показали, что характер распределения влаги в стенке силоса и зерновой среде аналогичен показанному на рисунке 5. Однако при этом толщина приконтактного слоя зерна, в котором после года хранения влагосодержание превысило критическое значение, возросла до 10 см.

Заключение. С помощью вычислительного эксперимента установлено, что в поверхностных слоях бетона стенок цилиндрических силосов для хранения зерна злаковых культур от климатических воздействий рассмотренного года (температуры и влажности воздуха, а также атмосферных осадков в виде дождя) возникают знакопеременные температурно-влажностные напряжения, амплитуда которых во время дождей возрастает в несколько раз. При этом значения вычисленных сжимающих и растягиваю-

щих напряжений могут значительно превышать их граничные значения для рассматриваемого класса бетона. В результате быстро повреждается структура бетона, образуются микротрещины и интенсифицируются процессы переноса влаги. Такой деградационный процесс сопровождается снижением прочности бетона, его способности сопротивляться проникновению жидких агрессивных сред и, следовательно, способности в достаточной мере защищать зерно от переувлажнения при длительном хранении. Для замедления неизбежного деградационного процесса, повышения долговечности и надежности силосов целесообразно использовать бетоны с низкими значениями коэффициента сорбции воды. Результаты выполненного вычислительного эксперимента свидетельствуют о том, что при эксплуатации силосов с толщиной стенки 0,2 м и выше значения этого коэффициента для бетона не должны превышать 0,02 кг/($м^2 \cdot с^{0,5}$).

ЛИТЕРАТУРА

1. Miller, R. Grain silos: Risk of collapse can be minimized / R. Miller // World Grain. – 1984. – № 1. – P. 28 – 30.
2. Wigram, S. Report on inventory of Swedish grain silos / S. Wigram // On design of silos for strength and flow: proc. 1-st int. conf., London, 1980 y. / Powder advisory centre. – London, 1980. – Vol. 1. – P. 1 – 23.
3. Кофанов, В.А. Оценка температурно-влажностных напряжений в двухслойной ограждающей конструкции, эксплуатируемой в климатических условиях г. Бреста / В.А. Кофанов, В.И. Никитин // Вестн. БрГТУ. – 2005. – № 2: Стр-во и архитектура. – С. 25 – 29.
4. Имитация тепло- и влагопереноса в теплоизоляционных материалах / В.И. Никитин [и др.] // Вестн. БрГТУ. – 2001. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – С. 56 – 60.
5. Кофанов, В.А. Поля влагосодержания и напряжений в увлажненной стенке при изотермической сушке / В.А. Кофанов, В.И. Никитин // Вестн. БрГТУ. – 2004. – № 1: Стр-во и архитектура. – С. 122 – 125.
6. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий / НИИСФ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1984. – 168 с.
7. Künzel, H.M. Simultaneous heat and moisture transport in building components. One- and two-dimensional calculation using simple parameters / H.M. Künzel // IRB Verlag, Suttgart. – 1995. – 66 p.
8. Лебедев, В.Б. Промышленная обработка и хранение смеси / В.Б. Лебедев. – М.: Агропромиздат, 1991. – 255 с.
9. Никитин, В.И. Оценка изотермического влагопереноса в зерновой среде, заполняющей силосы и склады / В.И. Никитин, И.А. Прусел, В.А. Кофанов // Вестн. БрГТУ. – 2006. – № 1: Стр-во и архитектура. – С. 100 – 104.
10. Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie: PN-B-03264, 2002.
11. Mukhopadhyaya, P. Effect of surface temperature on water absorption coefficient of building materials / P. Mukhopadhyaya, K. Kumaran, N. Normandin, P. Goundreau // Journal of thermal envelope and building science. – 2002. – V. 2. – № 2. – P. 179 – 195.
12. Summary report from task 3 of MEWS project / Institute for research in construction; K. Kumaran. – Ottawa, Canada (NRCC-45369), 2002. – 68 p.
13. Казаков, Е.Д. Биохимия зерна и продуктов его переработки / Е.Д. Казаков, В.Л. Кретович. – М.: Агропромиздат, 1989. – 368 с.
14. Пухонто, Л.М. Долговечность железобетонных конструкций инженерных сооружений: (силосов, бункеров, резервуаров, водонапорных башен, подпорных стен) / Л.М. Пухонто. – М.: Изд-во АСВ, 2004. – 424 с.

Поступила 23.05.2009