

где: P – усилие вырыва;
 α – угол между образующей конуса разрушения и осью шпура; $\alpha = \text{arctg}(R/l)$;
 Величину K_{ic} рекомендуется К.А. Пирадовым [2] определять на основе решения [3] о полукруговом диске с краевой трещиной, когда круговая граница закреплена, по зависимости:

$$K_{ic} = \sigma_r \sqrt{2\pi l} [0,8 / ((R/l)^3 - 1) + 0,7] \quad (3)$$

Прочность на сжатие бетона колонн в оттаянном состоянии, определенная методом пластической деформации в другой части здания составляла от 23 до 42 МПа при проектной марке М170.

В Межотраслевой научно-исследовательской лаборатории модифицированного бетона Белорусской государственной политехнической академии по отобранным в конструкциях опытным образцам были выполнены: определение влажности бетона; анализы пористости бетона, в том числе по кинетике его водопоглощения.

Результаты лабораторных испытаний бетона сведены в табл. 2.

Таблица 2.

Влажность бетона и показатели пористости

№ образца	$W_{max}, \%$ по массе	$W_{об min}, \%$	$W_{max}, \%$	X_1	λ	α
1-1	5.5	3.0	3.7	1.05	1.0	0.3
1-2	1.5	0.6	0.66	0.5	0.5	0.01
1-3	4.1	2.3	2.3	0.85	0.85	0.01
1-4	2.8	1.3	1.3	0.6	0.6	0.01
1-5	2.6	1.5	1.6	0.95	0.6	0.1

Примечание: X_1 -показатель среднего размера пор; λ - показатель пор с учетом α ;
 α - степень однородности пор по размерам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гузев Е.А., Леонович С.Н., Пирадов К.А. Механика разрушения : вопросы теории и практики. – Брест : БПИ, 1999. – 217с.
2. Пирадов К.А., Мамаев Т.Л., Кожобеков Т.А. Новый метод определения морозостойкости бетона на основе фундаментальных положений механики разрушения//Настоящий сборник.
3. Srivastava K.N., Kumar M.A. A note on the problem of edge crack in semi – circular plate // Int. J. Fract. – 1976.- 12, № 4.- p.6645 – 646.

УДК 624:621.642.3.04

Никитин В.И., Ракецкий В.М., Лапко А., Прусел И.А.

ГИГРОТЕРМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ СТЕНКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СИЛОСОВ

Для хранения сыпучих материалов часто используются железобетонные силосы цилиндрической формы монолитного или сборного исполнения. В процессе их эксплуатации на поверхности цилиндрических стенок образуется и развивается сетка глубоких трещин, которые в конце концов становятся причиной отказа силосов

или по несущей способности, или исходя из недопустимых условий хранения сыпучих материалов.

Такие явления могут происходить не только от механического нагружения, но и от воздействий окружающей среды. Изменения температуры и влажности наружного воздуха, а в отдельных случаях и сыпучей среды, приводят к изменению температурно-влажностного состояния бетона стенок силосов, с которым связаны термические и усадочные напряжения.

Необходимость учета влияния воздействий окружающей среды на величину напряжений, возникающих в бетонных стенках силосов, показана в ряде работ, например [1, 2, 3]. Однако в них основное внимание уделено изучению температурных воздействий.

Отмечается [1], что температурные воздействия на железобетонные стенки силосов обычно вызывают следующие напряжения:

1. Радиальные, тангенциальные и вертикальные напряжения при перепаде температур по толщине стенок.
2. Тангенциальные напряжения, связанные с возникновением дополнительного отпора при охлаждении стенок силоса.
3. Вертикальные усилия, связанные с разностью температур между отдельными жестко связанными силосами.

Первый вид термических напряжений может быть описан в рамках линейной теории упругости и вполне приемлемой осесимметричной плоской задачи (кольцо).

В общем случае для цилиндрической стенки (кольца), показанной на рис. 1,

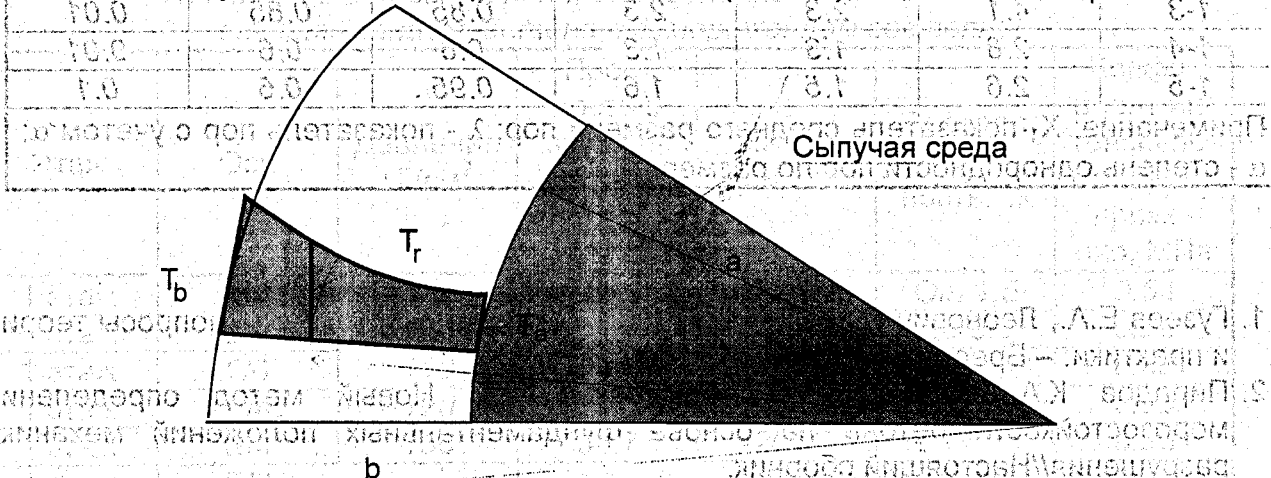


Рис. 1. Распределение температуры по толщине стенки силоса

при перепаде температуры по ее толщине величина радиальных σ_r и тангенциальных σ_θ температурных напряжений может быть найдена так [1]:

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{r^2} \left(\frac{r^2 - a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T_r \cdot r \cdot dr - \int_a^b T_r \cdot r \cdot dr \right); \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{r^2} \left(\frac{r^2 + a^2}{b^2 - a^2} \int_a^b T_r \cdot r \cdot dr + \int_a^b T_r \cdot r \cdot dr - T_r r^2 \right), \quad (2)$$

где: α — коэффициент линейного расширения;
 E — модуль упругости;
 a, b, r — внутренний, наружный и текущий радиус цилиндрической стенки;

T_r — температура поверхности стенки радиуса r .

Второй вид напряжений может проявиться тогда, когда заполненный силос на короткое время подвергается резкому охлаждению. При этом объем сыпучего материала, имеющего определенную деформативность, сокращается, а в обжимающей стенке силоса увеличиваются тангенциальные напряжения. Впервые на данный эффект было указано в работе [4]. Определение приращения термических тангенциальных напряжений можно выполнить с помощью формулы

$$\Delta\sigma_\theta = \frac{rE_m\alpha\Delta t_m}{rE_m/E + (b-a)(1-\nu_m)}, \quad (3)$$

где: E_m и ν_m — модуль упругости и коэффициент Пуассона сыпучего материала;

Δt_m — среднее значение понижения температуры стенки.

Из приведенных формул видно, что при наличии данных о температурных полях и коэффициенте линейного расширения бетона можно рассчитать термические напряжения в стенке силоса. Однако температурные поля следует рассматривать совместно с влажностными полями, формирующимися в связи с изменением температуры и влажности окружающего воздуха.

Известно [5], что изменение влажностного состояния бетона сопровождается обратимой капиллярной усадкой и возникновением знакопеременных напряжений. Напряжения, вызванные усадкой, могут превышать термические напряжения, поскольку коэффициент усадки (набухания) во много раз превышает коэффициент линейного расширения. Так, если по справочным данным для цементного раствора коэффициент линейного расширения равен $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}$ 1/град, то оценка коэффициента усадки, полученная по данным работы [5], составляет $\alpha_y = 6 \cdot 10^{-4}$ 1/% по массе. Следует отметить, что для определения усадочных напряжений можно воспользоваться формулами (1) и (2), заменив в них α на α_y , а $T_r = f(r)$ на влагосодержание $\omega_r = f(r)$.

Таким образом, для оценки температурных и усадочных напряжений в железобетонных стенках силосов желательно иметь математическое описание температурно-влажностных полей при периодическом изменении относительной влажности и температуры окружающего воздуха.

Задача описания нестационарных процессов переноса тепла и влаги в капиллярно-пористых материалах может быть выполнена на основе дифференциального уравнения Фурье с учетом граничных условий. Об эффективности такого подхода при построении температурных полей в цилиндрических силосах можно судить по результатам работы [6]. Это дало нам основу для разработки системы, позволяющей на ЭВМ имитировать процесс переноса тепла и влаги через многослойные цилиндрические стенки из капиллярно-пористых материалов [7].

Для выяснения предсказательной способности этой системы с точки зрения переноса влаги были использованы результаты работы [8], в которой экспериментально отслеживается процесс сушки образцов из цементно-песчаного раствора с соотношением между цементом и песком 1:2,5 по массе при В/Ц=0,4. Размеры образцов 4×4×28 см. Они твердели в течении 28 суток в воде при температуре 20-22°C. За сутки до испытания образцы были гидроизолированы со всех сторон, кроме одной поверхности испарения 4×28 см, для создания одномерного поля испарения.

После твердения в воде образцы, имеющие исходную влажность $\omega = 8,4\%$, выдерживались (сушились) на воздухе при температуре 20-22°C и относительной влажности воздуха $\phi = 50-55\%$. При этом через определенное время измерялось распределение влагосодержания по сечениям образцов (рис. 2).

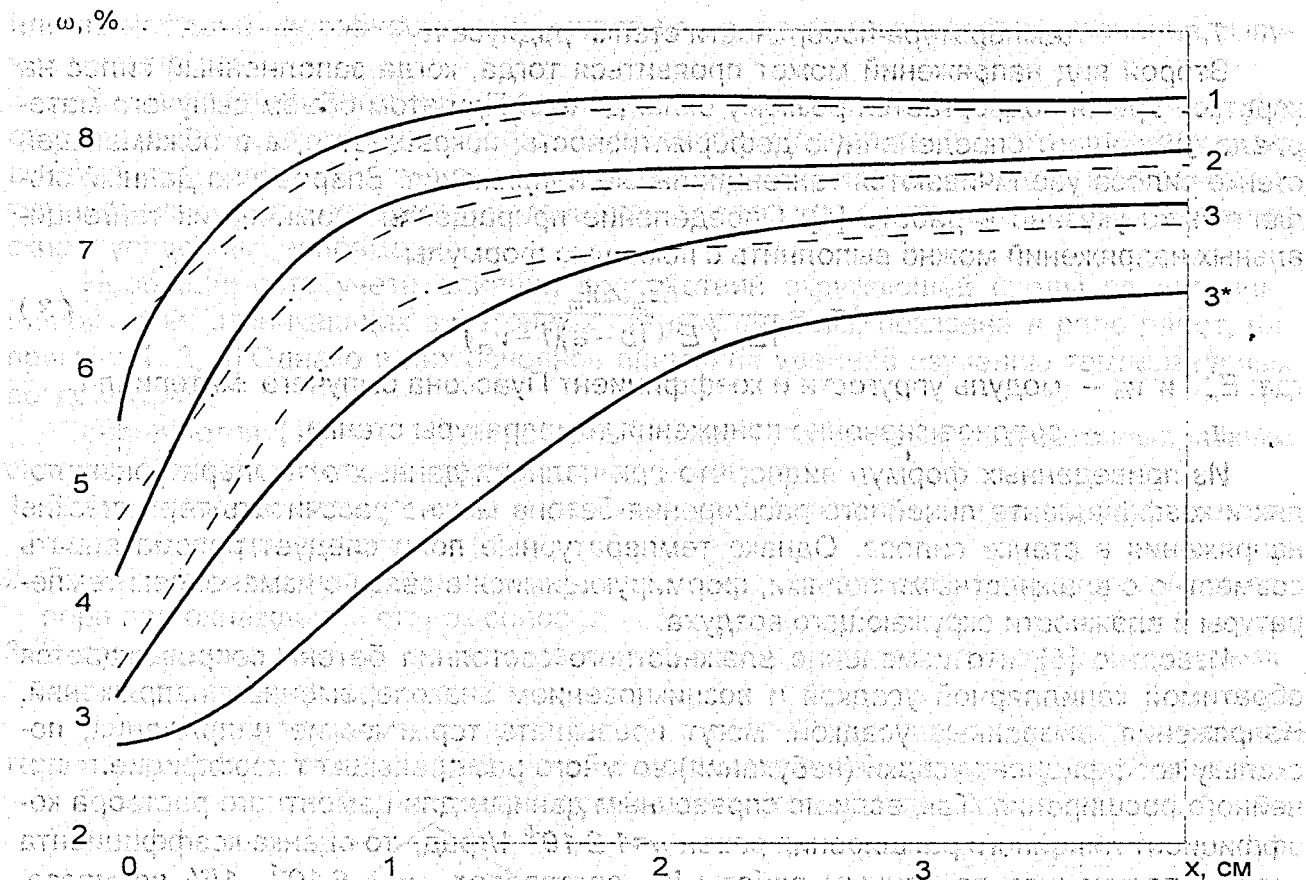


Рис. 2. Распределение влагосодержания по сечениям образца в процессе сушки: 1 - через 12 ч; 2 - 49 ч; 3 - 240 ч; 3* - 240 ч при μ_{80} и измененной изотерме десорбции

----- эксперимент; ————— расчет

Вычислительный эксперимент на разработанной системе имитации выполнялся после подготовки всех необходимых для этого данных. Так как потенциал переноса тепла (температура) в процессе сушки образцов во времени практически не изменялся, то прежде всего требовалось как можно точнее определить параметры, связанные с переносом влаги.

Изотерма десорбции водяного пара материалом образцов, приведенная на рис. 3, была установлена по данным работы [8]. Коэффициент влагопроводности $\beta(\omega)$ задали исходя из данных работы [9]. После обобщения справочных данных приняли: коэффициент паропроницаемости $\mu_{80} = 0,7 \cdot 10^{-4}$ г/(м·ч·Па) при влажности материала, соответствующей по изотерме десорбции относительной упругости пара $\varphi = 80\%$; плотность образцов в сухом состоянии $\rho = 1800$ кг/м³; сопротивление паропроницанию поверхности испарения $R_n = 40$ м²·ч·Па/г.

При выполнении вычислительных экспериментов значения μ для относительной упругости пара, отличной от $\varphi = 80\%$ корректировались с учетом формулы, предложенной В. М. Ильинским, с учетом коэффициента сорбции μ_{80} и относительной упругости пара φ (4)

$$\mu_x = \mu_{80} \frac{\omega_x}{\omega_{80}}, \quad (4)$$

где ω_{80} - весовая влажность материала, соответствующая по изотерме десорбции относительной упругости пара $\varphi = 80\%$.

Результаты вычислительного эксперимента, совмещенные с данными физического эксперимента [8], приведены на рис. 2. Из этого рисунка следует, что разработанная система имитации в состоянии достаточно точно описывать процессы переноса влаги в бетоне в жидкой и парообразной фазах. Опыт, накопленный при выполнении данного вычислительного эксперимента, дает основание утверждать, что точность предсказания экспериментальных данных (рис. 2) может быть улучшена при повышении достоверности данных о соответствующих физических свойствах материала и условиях, в которых происходил процесс сушки образцов.

Выполненное нами варьирование исходных условий вычислительных экспериментов показало, что в процессе сушки на величину и характер изменения влагосодержания по сечениям образца наиболее существенно влияют характеристики изотермы десорбции материала, значения коэффициента паропроницаемости и относительной влажности воздуха. Для иллюстрации влияния первых двух факторов на распределение влагосодержания по сечениям образца на рис. 2 приведена еще одна кривая 3, построенная по результатам вычислений. Эти вычисления выполнялись без учета зависимости (4) при постоянном значении коэффициента паропроницаемости равном μ_{80} , а использованная изотерма десорбции $\omega^*(\varphi)$ при любом значении относительной упругости паров φ была связана с изотермой десорбции $\omega(\varphi)$, приведенной на рис. 3, соотношением $\omega^*(\varphi)/\omega(\varphi) = 0,9$.

Вычислительным экспериментом подтвержден вывод работы [8], полученный по экспериментальным данным, о том, что изменение влагосодержания у поверхности испарения и в толще образца описываются различными зависимостями, позволяющими установить зону испарения. Зная глубину зоны испарения, можно воспользоваться формулой работы [7] и рассчитать изменение капиллярного давления в поверхностных слоях бетона, а затем оценить снижение его прочности от непроявившейся капиллярной усадки.

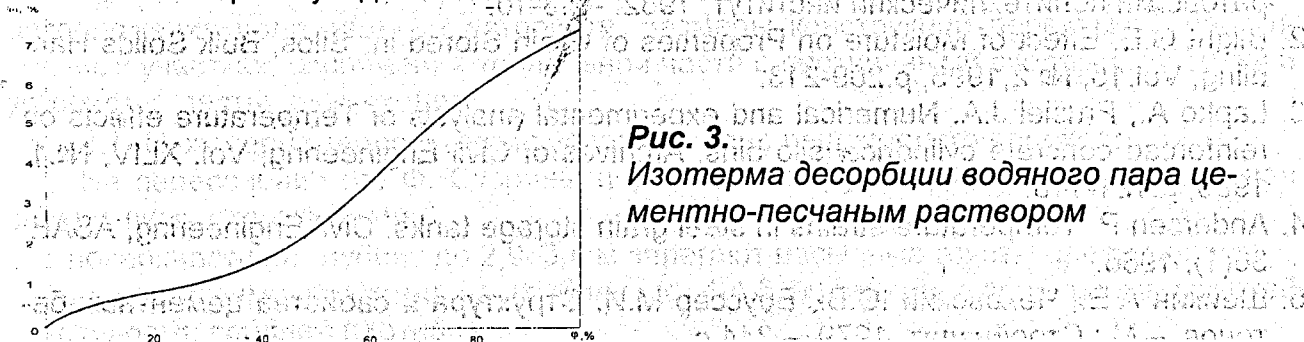


Рис. 3.
Изотерма десорбции водяного пара цементно-песчаным раствором

Понятно, что от непроявившейся капиллярной усадки поверхностные слои бетона окажутся растянутыми, а внутренние - сжатыми. В условиях переменной температуры и влажности воздуха поверхностные слои бетона могут не только обезвоживаться, но и увлажняться за счет капиллярной конденсации. Такие циклические изменения влагосодержания поверхностного слоя сопровождаются деформациями усадки и набухания, амплитуда колебаний которых может иметь существенные значения [10]. Возникающие при этом знакопеременные напряжения приводят к необратимым изменениям в структуре бетона, появлению и развитию микротрещин, что в свою очередь снижает трещиностойкость и долговечность железобетонных конструкций.

Совершенно очевидно, что отслеживание колебаний температуры и влажности окружающего воздуха при оценке термических и усадочных напряжений в стенке силосов играет исключительно важную роль. Однако в действующих методиках расче-

та это явление не учитывается, что затрудняет оценку долговечности конструкций.

Наиболее простой и естественных способ учета колебаний температуры и влажности заключается в использовании вероятностных методов. Продолжительность процессов поверхностной эрозии бетона исчисляется годами, поэтому сезонные и суточные колебания температуры и влажности могут рассматриваться как стационарный случайный процесс. В таком процессе можно выделить как постоянную составляющую (математическое ожидание рассматриваемой величины), так и переменную составляющую. В качестве статистических данных, необходимых для выполнения расчетов, можно использовать данные метеоусловий.

Можно использовать и другое описание циклических колебаний температуры и влажности воздуха у поверхности конструкции. Зависимость температуры и влажности во времени на временном интервале, равном одному году, может рассматриваться в качестве периодической функции, которая может быть разложена в ряд Фурье по известным правилам.

Разработанная нами система имитации [7] уже позволяет построить температурно-влажностные поля в стенке силосов с учетом изменения температуры и влажности окружающего воздуха, а при наличии опытных данных о коэффициентах линейного расширения α и усадки (набухания) α_y открывает возможность определить соответствующее этим полям распределение деформаций и напряжений в любой момент времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев Л.Т., Карев В.И., Скориков Б.А. Исследования воздействия температуры на стенки железобетонных зерновых силосов // Исследования напряженного состояния железобетонных силосных сооружений. Межвуз. научн. сб. - Саратов: Саратовский политехнический институт, 1982. - с.3-10.
2. Blight G.E. Effect of Moisture on Properties of Grain Stored in Silos, Bulk Solids Handling, Vol.15, № 2, 1995, p.209-213.
3. Lapko A., Prusiel J.A. Numerical and experimental analysis of Temperature effects on reinforced concrete cylindrical silo bins, Archives of Civil Engineering, Vol. XLIV, №.1, 1998, p.121-148.
4. Andersen P. Temperature strains in steel grain storage tanks. Civil Engineering, ASAE, 36(1), 1966.
5. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. - М.: Стройиздат, 1979. - 344 с.
6. Prusiel J.A., Nikitin W. Analize efektow termicznych w cylindrycznych silosach zelbetowych na osrodki sypkie. XI Konferencja "Zelbetowe sprężone zbiorniki na materialy sirsie i ciecz". Swieradow-Zdroj, 2000, s.161-168.
7. Никитин В.И., Ракецкий В.М., Лапко А., Прусел И.А. Имитация тепло- и влагопереноса в теплоизоляционных материалах // "Вестник БГТУ - Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология", №2, 2001.
8. Федоров А.Е., Курушин А.Д., Афанасьев С.Г., Серов А.М. Методика определения градиента влагосодержания в поверхностных слоях бетона // Изв.вузов. Строительство и архитектура. - 1986.-№9.-с.127-130.
9. Руководство по расчету влажностного режима ограждающих конструкций зданий / НИИСФ Госстроя СССР. - М.: Стройиздат, 1984. - 168 с.
10. Шейкин А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня. - М.: Стройиздат, 1974. - 192 с.