

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ХРАНИЛИЩ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Жданов А.А., к.т.н., доц

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры,
Украина*

Из внешних воздействий, которые необходимо учитывать при прочностном расчете металлических цилиндрических хранилищ для сыпучих материалов (МЦХСМ), недостаточно исследованы и поэтому в расчетах не учитываются в полной мере температурные климатические воздействия (ТКВ)—изменение температуры наружного воздуха и интенсивности солнечной радиация - прямой и рассеянной. Температурные поля, которые наводят ТКВ в вертикальных металлических цилиндрических хранилищах сыпучих материалов, как показывают исследования на моделях и на натурных объектах [1] (Фото 1), отличаются нестационарностью, влиянием географического места расположения объекта, времени года и многими другими факторами. Так, на гармонические годовые колебания температуры наружного воздуха накладываются гармонические сезонные колебания, а на них, в свою очередь, гармонические суточные колебания с соответствующими фазовыми сдвигами. Интенсивность солнечной радиации также непостоянна как в течение суток, так и на более длинных отрезках времени [2,3].

В данной работе на основе гармонической аппроксимации выполненных автором экспериментальных исследований [1] предложено аналитическое описание температурных полей, наводимых в стенке МЦХСМ, как внешнего климатического температурного воздействия при прочностном расчете стенки хранилища. На рис.1 - 3 приведены характерные графики температурных полей, наводимых в тонкостенных металлических цилиндрических оболочках модели (рис. 1, 2) и натурной стальной силосной оболочки (рис.3).

Температурное поле полностью освещенной солнцем цилиндрической оболочки можно разбить на два участка, в пределах которых оно приближенно описывается функцией:

$$\left. \begin{aligned}
 t(\beta) &= t_0 + t_1(1 + \cos 1,5\beta), & (0 \leq \beta \leq \pm 2\pi/3) \\
 t(\beta) &= t_0, & (2\pi/3 \leq \beta \leq \pm \pi)
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

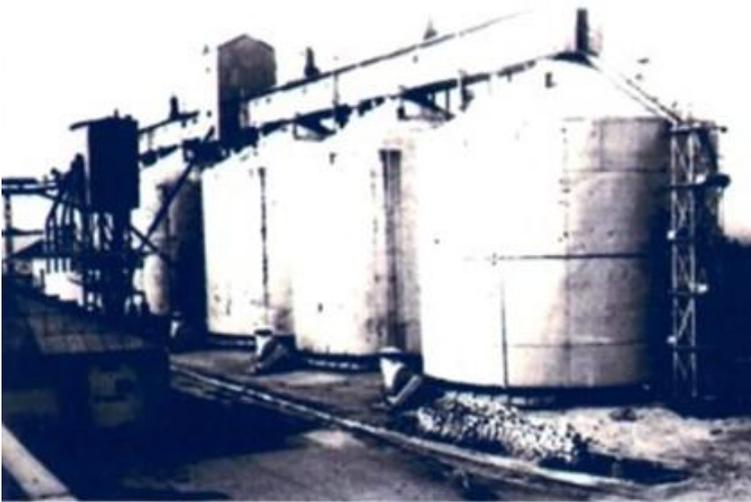


Фото.1. Объект натуральных исследований – зернохранилище на Дрокиевском ХПП (Молдова)

В таком представлении температурное поле полностью освещенной солнцем оболочки является симметричным относительно нормали падения солнечных лучей. Отличие экспериментальных и теоретических данных по величине средне интегральной температуры первого участка не превышает 5%.

Представление функции (1) рядом Фурье имеет вид:

$$t^* = t_0 + \frac{2t_1}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} t_{nc} \cos n\beta, \quad (2)$$

где
$$t_{nc} = -(4,5t_1 \sin 2\pi \cdot n/3) / (\pi \cdot n(n^2 - 2,25)). \quad (3)$$

Пяти гармоник в (2) достаточно для практически неотличимой аппроксимации (см. рис.4 а).

Температурное поле оболочки, половина которой закрыта экраном (тень от рядом стоящего сооружения), можно разбить на два участка, в пределах которых его можно описать функцией:

$$\left. \begin{aligned} t(\beta) &= t_0 + t_1(1 + \cos 1,5\beta), & (0 \leq \beta \leq 2\pi/3) \\ t(\beta) &= t_0, & (2\pi/3 \leq \beta \leq 2\pi) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

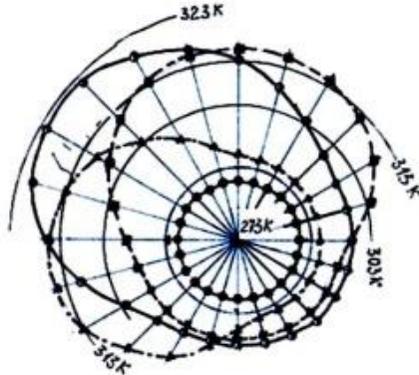


Рис.1. Температурное поле модели хранилища, измеренное 04.10.77 г.:

▲ - 10^{00} ; ○ - 13^{00} ; ■ - 16^{00} ; ● - 18^{00}

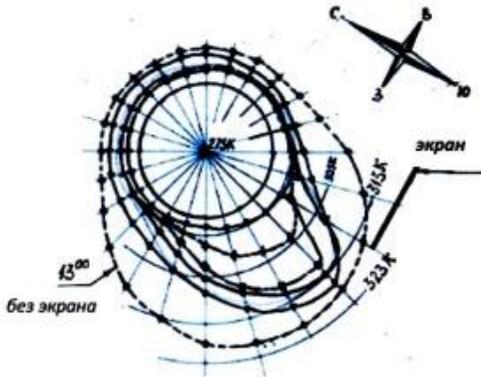


Рис.2. Температурное поле модели хранилища, измеренное 11.10.77 г.:

● - 11^{40} ; ◆ - 11^{45} ; ■ - 12^{00} ; ○ - 12^{20} ; ▲ - 12^{40} ; ● - 13^{00}

Разложение этой функции в ряд Фурье имеет вид:

$$t^* = t_0 + \frac{t_1}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} (t_{nc} \cos n\beta + t_{ns} \sin n\beta), \quad (5)$$

где $t_{nc} = -(2,25t_1 \sin 2\pi \cdot n/3) / (\pi \cdot n(n^2 - 2,25)),$ (6)

$t_{ns} = t_1[2n/(n^2 - 2,25) + 2,25(\cos 2\pi \cdot n/3 - 1)/(n(n^2 - 2,25))] / \pi.$ (7)

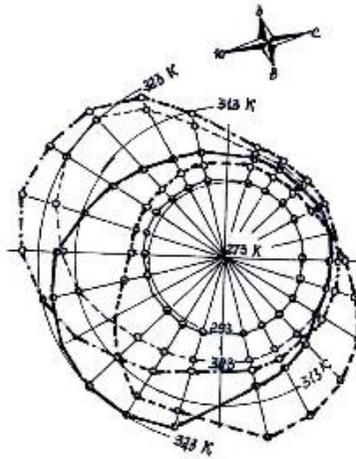


Рис. 3. Характерное температурное поле хранилища, измеренное 18.08.79 г.: \ominus - 9^{00} ; \bullet - 12^{00} ; ∇ - 15^{00} ; \circ - 17^{30} ; \ominus - 21^{00}

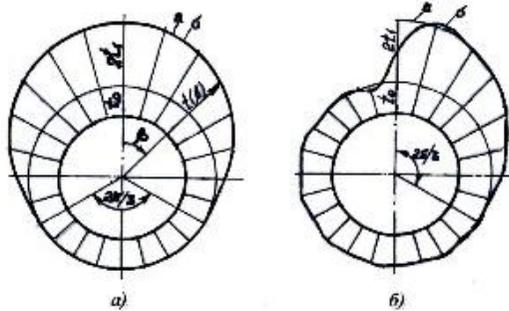


Рис. 4. Температурные поля оболочки описанные аналитически и рядами Фурье:
а - полностью освещенной солнцем; б - на половину закрытой экраном

На рис. 4,б приведен график функции (4) и аппроксимация её рядом (5), включающим десять гармоник при $t_0 = t_1 = 1$. При этом аппроксимированное рядом (5) температурное поле в большей степени соответствует экспериментальным данным в зоне границы «солнце-тень».

Анализ выполненных расчетов показал, что для полностью освещенной солнцем оболочки погрешность аппроксимации температурного поля рядом (2) максимальна на втором участке и не превышает 0,5%; при наличии экрана погрешность аппроксимации рядом (5) максимальна в зоне границы «солнце-тень» и для $\beta = 15^\circ$ составляет 6%.

С достаточной для практики расчетов точностью температурное поле полностью освещенной солнцем вертикальной цилиндрической оболочки можно аппроксимировать рядом (2), содержащим пять гармоник разложения только по косинусам. Температурное поле оболочки с экраном, закрывающим половину оболочки, можно аппроксимировать рядом (5), содержащим десять гармоник разложения по синусам и косинусам. В табл.1 приведены коэффициенты разложения для обоих видов температурного поля оболочки.

Табл.1. Коэффициенты разложения температурных полей в ряды Фурье

n	Оболочка без экрана		Оболочка с экраном	
	t_{nc}	t_{ns}	t_{nc}	t_{ns}
1	0,9920	0	0,4962	0,3500
2	0,3540	0	0,1772	0,4206
3	0	0	0	0,2829
4	-0,0226	0	-0,0113	0,1657
5	0,0109	0	0,0054	0,1305
6	0	0	0	0,1132
7	0	0	-0,0019	0,0920
8	0	0	0,0013	0,0803
9	0	0	0	0,0728
10	0	0	-0,0006	0,0640

Все вышеизложенное позволяет предложить расчетный метод определения (задания) температурных полей вертикальных металлических цилиндрических хранилищ сыпучих материалов, основанный на представлении температурного поля оболочек рядами (2) и (5), амплитуды которых определяются с учетом данных климатологических наблюдений и рекомендаций СНиП.

Для расчета максимальных температур нагрева стенки МЦХСМ необходимо учитывать совпадение максимумов температуры наружного воздуха и солнечной радиации. По данным [2, 3] в июле, как наиболее жарком месяце, температура наружного воздуха достигает максимума в 15 часов. По данным А.И.Кругловой [4] в июле месяце в точки вертикальной поверхности западной ориентации в 15-16 часов поступает максимальное количество прямой и рассеянной солнечной радиации.

С учетом этого параметры температурного поля МЦХСМ, описываемого рядами (2), (5), $-t_0$ и t_1 можно определить по формулам:

$$t_0 = t_{iA}^{15} + p \cdot Q_{DA}^{15} / \alpha_f, \quad (8)$$

$$2t_1 = p \cdot (Q_{iC}^{15} + Q_{DC}^{15} - Q_{DA}^{15}) / \alpha_f, \quad (9)$$

где t_{iA}^{15} - расчетная температура наружного воздуха в 15 часов (определяется по СНиП [6] с учетом [6]);

p - коэффициент поглощения солнечной радиации наружной поверхностью МЦХСМ (данные для некоторых видов поверхностей приведены в [7, 8, 9, 10]);

Q_{DA}^{15}, Q_{DC}^{15} - рассеянная солнечная радиация, поступающая на вертикальные поверхности, соответственно, восточной и западной ориентации при безоблачном небе в июле в 15 часов (принимается по табл. 82 Приложения [4]);

Q_{iC}^{15} - прямая солнечная радиация, поступающая на вертикальную поверхность западной ориентации при безоблачном небе в июле в 15 часов (принимается по табл. 27 Приложения [4]);

α_f - коэффициент теплоотдачи наружной поверхности стенки МЦХСМ (с учетом скорости ветра определяется по формуле Франка [4]).

Минимальная температура стенки МЦХСМ в суточном цикле нагрева - охлаждения может быть принята одинаковой для всех её точек и определена по формуле:

$$t_0 = t_{VII}^{\bar{N}i} - \Delta_{VII} - 3 - 0,5 \cdot t_{VII}^{\bar{A}i}, \quad (10)$$

где $t_{VII}^{\bar{N}i}$ - многолетняя среднемесячная июльская температура, принимаемая по картам 5 и 6 гл. СНиП II-6-74 [5];

Δ_{VII} - отклонение средней температуры наиболее теплых суток от значения $t_{VII}^{\bar{N}i}$ (по данным [6] $\Delta_{VII} = 6$ К);

$t_{VII}^{\bar{A}i}$ - нормативное значение средних амплитуд (точнее размахов) суточных колебаний температуры в июле (принимается по табл. 2 гл. СНиП II-A.6-72).

Выводы

1. Предложен экспериментально-расчетный способ задания температурных климатических воздействий на стенки МЦХСМ с учетом

влияния прямой и рассеянной солнечной радиации, времени года и места расположения объекта.

2. Температурное поле принимается квазистационарным, рассчитывается для наиболее жаркого месяца июля на 15 часов для полностью освещенной солнцем оболочки и при наличии экрана, закрывающего по всей высоте половину стенки хранилища. В суточном цикле минимальная температура стенки осесимметрична и может быть принята равной температуре наружного воздуха в 3 часа ночи.

3. Представление температурного воздействия в рядах Фурье удобно и для последующего анализа напряженно-деформированного состояния стенки хранилища, компоненты которого отыскиваются разложением в ряды Фурье.

Summary

The results of measurements of a harmonic approximation of the temperature fields wall vertical cylindrical metal storage of bulk materials had induced in it climatic temperature impacts - changes in the outdoor temperature, direct and diffuse solar radiation. The technique of definition of the amplitudes of harmonics of temperature fields was proposed.

1. Обзор конструкций. Исследование деформативных характеристик зерна и параметров температурных воздействий: Отчет/ОТИПП им. М.В.Ломоносова; Научный руководитель к.т.н., доц. А.В.Анатольев. Ответственный исполнитель инж. А.А.Жданов. – Шифр работы 98/76; № ГР 77011443. – Одесса, 1978. – 99 с.
2. Шкловер А.М. Теплотехнический расчет зданий, расположенных на Юге СССР. – М.: Стройиздат, 1952. – 44 с.
3. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1973. – 287 с.
4. Круглова А.И. Климат и ограждающие конструкции. – М.: Стройиздат, 1970. – 167 с.
5. Строительные нормы и правила. Ч.П.гл.6. Нагрузки и воздействия: Нормы проектирования. СНИП II-6-74. – М.: Стройиздат, 1976.
6. Бельшев И.А. Нормирование температурных климатических воздействий для расчета конструкций зданий. – В кн.: Расчеты строительных конструкций. М., 1976, вып.42. с. 23-36. (Труды института / ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко; вып.42).
7. Пуховский А.Б. Об статическом расчете замкнутых металлических цилиндрических оболочек под действием солнечной радиации. – Известия вузов. Строительство и архитектура, 1965, № 3, с. 27-32.
8. Пуховский А.Б. Об одной задаче статического расчета металлических цилиндрических оболочек в условиях одностороннего нагрева. – Известия вузов. Строительство и архитектура, 1967, №3, с. 27-32.
9. Тамплон Ф.Ф. Нагрев металлических ограждающих конструкций под действием солнечной радиации. – Промышленное строительство, 1974, № 6, с. 38-41.
10. Тамплон Ф.Ф., Николашкин Г.А. Натурные обследования кровель и стен из алюминиевых панелей. – Промышленное строительство, 1970, № 9, с. 36-39.