

Таблица 2. Изменение прогиба ригеля рам

F, кН	Прогиб ригеля рамы, мм															
	первая серия				вторая серия					третья серия						
	РК-1	РКР-1	РПР-1	%*	РК-2	РКР-2	F, кН	РПР-2/1	РПР-2/2	%*	РК-3	РКР-3	F, кН	РПР-3/1	РПР-3/2	%*
0	-	0	0		0	0,0	0	0,0	0,0		-	0	0	0	0	
0	0	-1,9	-1,6		0,0	-2,6	0	-2,3	-2,2		0	-1,4	0	-1,4	-1,3	
5,0	-	-0,3	-0,7		0,8	-0,9	-	-	-		0,8	-0,2	8,0	0,3	0,2	
10,0	1,2	0,6	-0,1		1,4	-0,2	8,5	-0,4	-0,6		1,6	0,8	16,0	1,2	1,8	
15,0	-	1,3	0,8		2,1	0,6	17,0	1,1		37,5	2,4	1,5	24,0	2,3	3,1	27,1
20,0	3,2	2,0	1,7	36,2	2,8	1,3	-	-	-		3,2	2,3	26,0	2,7	4,3	
25,0	-	3,0	2,6		3,5	1,9	25,5	2,2	2,3		4,0	3,0	28,0	2,9	-	
30,0	5,7	4,1	3,7		4,2	2,6	-	-	-	17,1	4,9	3,6	30,0	3,2	-	17,9
35,0	-	5,5	4,7		4,9	3,2	34,0	3,1	3,6		5,6	4,2	32,0	3,4	4,3	
40,0	8,5	6,7	6,3	21,5	5,8	4,0	42,5	4,2	4,8		6,6	5,1	34,0	3,8	-	
45,0	-	7,9	7,4		6,5	4,9	-	-	-		7,4	5,9	36,0	4,1	-	
50,0	11,7	9,3	-		7,4	5,6	51,0	5,6	6,2		8,2	6,6	40,0	-	5,6	
55,0	-	10,6	-		8,2	6,4	-	-	-		9,2	7,5	48,0	-	6,9	
60,0					9,1	7,5	59,5	7,0	7,7		10,3	8,5	56,0	-	8,4	
65,0					10,2	8,5					11,4	9,5				
70,0					11,2	9,7					12,5	10,5				
75,0					12,5	11,3					13,7	11,9				13,1
80,0					14,1	12,9				8,8	-	-				
F_u	59,8	62,1	-		83,3	85,8					81,6	84,3				

прогибами находилась в пределах 30–40%, с увеличением нагрузки разница прогибов уменьшалась, при $F = 60$ кН она составляла 17%. Диаграммы изменения прогиба ригеля рам второй и третьей серии показаны на рисунках 5 и 6 соответственно.

Следует отметить, что во всех рамах с искусственным регулированием усилий, перед началом приложения к ним нагрузки, в затяжке создавалось предварительное усилие. В результате чего возник отрицательный прогиб ригеля (так называемый строительный подъем), что примерно составлял 16–20% от значения прогиба перед разрушением рамы.

Заключение. Экспериментальные исследования железобетонных рам с искусственным регулированием усилий показали, что при предварительном натяжении затяжки изменяются изгибающие моменты в узлах и пролёте, а прогиб ригеля рамы может уменьшаться до 40%.

Уменьшение прогиба ригеля железобетонной рамы, с помощью искусственного регулирования усилий в затяжке, целесообразно использовать при проектировании большепролетных рамных конструкций.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Жалізебетонні конструкцыі: падручнік / А.Я. Барашиков, Л.М. Буднікова, Л.В. Кузнецов [та інш.]; пад ред. А.Я. Барашикова. – К.: Вища школа, 1995. – 591 с., іл.
2. Жалізебетонні конструкцыі: падручнік / П.Ф. Вахненко, А.М. Павліков, О.В. Горик, В.П. Вахненко]; пад ред. П.Ф. Вахненка. – К.: Вища школа, 1999. – 508 с., іл.

3. Шуллер, В. Конструкции высотных зданий / В. Шуллер; [пер. с англ. Л.Ш. Климника] – М.: Стройиздат, 1979. – 248 с. ил.; перевод изд.: High-Rise Building Structures / W. Shueller. – New York, London, Sydney, Toronto.
4. Гусениця, А.П. Конструкції багатопверхових каркасних будинків та їх розрахунки: навчальний посібник / А.П. Гусениця, П.П. Шандрук. – К.: КНУБА, 2002. – 72 с.
5. Гайчук, І.В. Дослідження роботи двохшарнірних залізобетонних рам з штучним регулюванням зусиль / І.В. Гайчук // Ресурсоєкономні конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне: Видавництво НУВГП, 2012. – Випуск 23. – С. 153–159.
6. Бабич, Є.М. Робота двохшарнірних залізобетонних рам з штучним регулюванням зусиль при повторних навантаженнях / Є.М. Бабич, І.В. Гайчук // Будівельні конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць. – Київ: ДП НДІБК, 2011. – Випуск 74, Книга 1. – С. 182–197.
7. Бабич, Є.М. Триціноутворення в двох шарнірних залізобетонних рамах з штучним регулюванням зусиль при повторних навантаженнях / Є.М. Бабич, І.В. Гайчук // Збірник наукових статей. Стале-залізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація. – Вип. 9. – Кривий Ріг: КТУ, 2011 – С. 29–34.
8. Гайчук, І.В. Робота двохшарнірних залізобетонних рам з штучним регулюванням зусиль при змінному рівні повторних навантажень // Збірник наукових праць. Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Вип. 22. – Рівне: НУВГП, 2011. – С. 235–243.

Матеріал поступил в редакцию 04.03.15

BABICH E.M., HAYCHUK I.V. Study of the impact of regulation efforts in concrete frames on the deformation of crossbar

The experimental results of deflection crossbar concrete frame with artificial regulation efforts in monotonic loading frame crossbar.

УДК 692.699.82

Никитин В.И., Бацкель-Бжозовка Б.

ОБ УЧЕТЕ АНИЗОТРОПИИ СТЕНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАСЧЕТАХ КАПИЛЛЯРНОГО ВПИТЫВАНИЯ ДОЖДЕВОЙ ВЛАГИ

Введение. Ограждающие конструкции зданий из капиллярно-пористых материалов часто подвергаются воздействию косого дождя. В зависимости от его интенсивности и продолжительности, а также капиллярных свойств материала масса дождевой влаги пада-

ющая на вертикальную поверхность ограждения, полностью или частично впитываемая капиллярами материала, существенно повышает влагосодержание ограждающей конструкции. Не случайно, в ряде работ, например [1, 2, 3], отличается, что одной из главных

Никитин Вадим Иванович, д.т.н., профессор Государственной высшей школы им Я.Павла II в Бялой Подляске, Польша.

Бацкель-Бжозовска Беата, к.т.н. Политехники Белостоцкой, Польша.

Строительство и архитектура

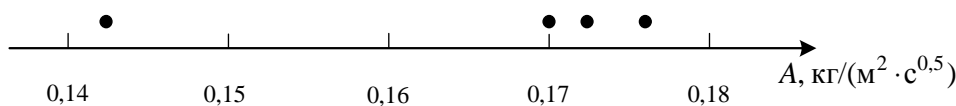


Рис. 1. Выборочные результаты

причин повышенного влагосодержания ограждающих конструкций является косой дождь. В Европейской норме [4] при расчете нестационарных процессов переноса влаги в капиллярно-пористых материалах ограждающих конструкций также рекомендуется учитывать влагу, впитываемую материалом при косом дожде.

В работе [5] предложена методика определения потока влаги q_w , впитываемой вертикальной поверхностью ограждения, которая учитывает горизонтальную составляющую потока косого дождя q_p его продолжительность τ , коэффициент сорбции воды A , влагосодержание материала в текущий момент W и в состоянии свободного капиллярного насыщения W_k , активной пористости $\Phi_a = w_k / \rho$, где ρ – плотность воды. Значение потока q_w , а также коэффициента влагопереноса D_w , учитывающего особенности пористой структуры материала и физические свойства переносимой жидкости, необходимо для расчета процесса нестационарного влагопереноса в ограждениях. При проведении этих расчетов предполагается, что пористая структура материала является однородной и изотропной. Однако стеновые материалы в большей или меньшей мере не удовлетворяют таким условиям. Ряд изделий стеновых материалов, характеризуется ярко выраженной слоистой текстурой, приводящих к анизотропии физических свойств. К ним в первую очередь можно отнести изделия стеновой керамики, строительные камни из осадочных горных пород, древесину и др.

Не трудно предположить, что в направлении перпендикулярном слоям текстуры сопротивления капиллярному впитыванию воды M_{\perp} будет больше, чем в направлении параллельном этим слоям M_{\parallel} . В таком случае, согласно работе [6], для коэффициента сорбции воды A и коэффициента влагопроводности D_w будет иметь место обратная картина. Очевидно, что если разница значений упомянутых свойств в этих взаимоперпендикулярных направлениях оказывается статически значимой, то ее следует учитывать при выполнении расчетов и возведении ограждений. Для количественной оценки анизотропии керамического материала с точки зрения капиллярного влагопереноса в работе [6] предложено использовать отношение, названное коэффициентом анизотропии

$$K_a = D_{w_{\perp}} / D_{w_{\parallel}}, \quad (1)$$

которое показывает во сколько раз значение коэффициента влагопроводности в направлении параллельном слоям текстуры материала $D_{w_{\parallel}}$ превышает значение этого коэффициента в направлении перпендикулярном слоям текстуры $D_{w_{\perp}}$. Отметим, что при определении коэффициента $D_{w_{\perp}}$, как показано в работе [7], необходимо преодолеть трудности экспериментального и вычислительного характера.

В данной работе на основе статистического анализа опытных данных о значениях коэффициента сорбции воды A и влагосодержания материала в состоянии капиллярного водонасыщения W_k в направлении перпендикулярном и параллельном слоям текстуры глиняного кирпича пластического формования и известкового камня показано, что параметр W_k не зависит от направления впитывания влаги. Это позволило предложить более простой и не менее точный, чем по формуле (1), способ определения коэффициента анизотропии материала K_a при капиллярном влагопереносе.

Анализ опытных данных, полученных для образцов глиняного кирпича. Использовались данные полного двухфакторного эксперимента, в котором оценивалось влияние температуры обжига на двух уровнях (850 и 1050°C) и направления капиллярного впитывания воды (вдоль и поперек волокон текстуры материала) на значения коэффициента сорбции воды A и влагосодержания керамического материала при капиллярном насыщении W_k . Методика подготовки образцов глиняного кирпича пластического формования, а также методика измерения значений показателей A и w_k по данным о кинетике одномерного капиллярного впитывания воды описаны в работе [6]. Для каждого показателя (A и w_k) анализировалось по четыре выборки из четырех элементов. Каждую выборку следует рассматривать как опыт, который повторился четыре раза (малая выборка).

По различным причинам отдельные результаты измерений в выборке могут иметь существенные отклонения от основной массы результатов. Такие результаты часто называют резко выделяющимися, грубыми, аномальными или просто выбросами. Наличие выбросов изменяет параметры случайной величины и может приводить к неверным выводам. Поэтому оценке параметров распределения (среднее арифметическое, дисперсия и т.д.) должна предшествовать проверка результатов опытов на наличие выбросов, которые выявляются довольно просто.

Для примера рассмотрим выборку, в которой был выявлен один выброс. В этой выборке для четырех образцов, обожженных при температуре 1050°C, были определены значения коэффициента A_{\perp} (впитывание влаги вдоль волокон текстуры) и получены следующие результаты: 0,172; 0,170; 0,176; 0,142 кг/(м² с^{0.5}). Если упорядочить результаты опытов по возрастанию их значений, то получим последовательность: 0,142; 0,170; 0,172; 0,176 кг/(м² с^{0.5}). На рис. 1 приведена точечная диаграмма, иллюстрирующая эту последовательность.

Из рис. 1 видно, что один результат, имеющий значение $A_{\perp} = 0,142$, кг/(м² с^{0.5}) представляется подозрительным. Разработан ряд критериев, с помощью которых принимается решение по исключению (или не исключению) подозрительных результатов из выборки.

В работе [8] для выборки x_1, x_2, \dots, x_n значений случайной величины X со средним арифметическим \bar{x} и стандартным отклонением S_x предлагается использовать величины

$$V = \frac{\bar{x} - x_{\min}}{S_x \sqrt{\frac{n-1}{n}}} \quad (2)$$

или

$$V' = \frac{x_{\max} - \bar{x}}{S_x \sqrt{\frac{n-1}{n}}}, \quad (3)$$

которые имеют специальные распределения, зависящие только от числа степеней свободы $\nu = n - 2$.

В соответствии с формулой (2) при $\bar{x} = 0,165$ и $S_x = 0,0155$ для сомнительного результата имеем:

$$V = \frac{0,1650,142}{0,0155 \sqrt{\frac{4-1}{4}}} = 1,716.$$

Таблица 1. Результаты измерений коэффициента сорбции воды A и влагосодержания образцов глиняного кирпича в состоянии капиллярного насыщения W_k , а также средние арифметические значения и дисперсии выборок.

Температура обжига	1050°C				850°C			
	Вдоль волокон		Поперек волокон		Вдоль волокон		Поперек волокон	
№ выборки (i)	1	2	3	4	5	6	7	8
Измеряемый параметр	A_{\square} , кг/(м ² с ^{0,5})	$W_{k\square}$, кг/м ³	A_{\perp} , кг/(м ² с ^{0,5})	$W_{k\perp}$, кг/м ³	A_{\square} , кг/(м ² с ^{0,5})	$W_{k\square}$, кг/м ³	A_{\perp} , кг/(м ² с ^{0,5})	$W_{k\perp}$, кг/м ³
Результаты измерений	0,172	256,7	0,0080	261,8	0,239	298,7	0,078	262,5
	0,170	273,0	0,077	259,9	0,195	280,4	0,072	287,9
	0,176	262,8	0,082	245,5	0,230	297,3	0,068	232,8
	0,166	263,0	0,077	281,6	0,244	305,9	0,086	289,7
Среднее \bar{X}_i	0,171	263,9	0,079	262,2	0,227	295,6	0,076	268,2
Дисперсия S_i^2	$17,33 \cdot 10^{-6}$	45,56	$6,0 \cdot 10^{-6}$	220,23	$488,7 \cdot 10^{-6}$	116,54	$61,3 \cdot 10^{-6}$	713,41

Для наиболее популярного в инженерных исследованиях уровня значимости $\alpha = 0,05$ и степенях свободы $\nu = 4 - 2 = 2$ по таблице 2 [8] находим критическое значение $V_{0,05;2} = 1,689$, которое не превышает опытного значения $V = 1,716$. Следовательно, при уровне значимости $\alpha = 0,05$ значение коэффициента сорбции воды $A = 0,142$ кг/(м² с^{0,5}) является выбросом и его нужно из выборки исключить.

Чтобы окончательно принять такое решение дополнительно был использован еще один критерий, представленный в работе [9]. Согласно этой работы по опытным данным определяются величины

$$r = \frac{X' - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (4)$$

или

$$r' = \frac{X_{\max} - X'}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (5)$$

где X' – результат измерения, значение которого наиболее близко значению X_{\min} в формуле (4) или X_{\max} в формуле (5).

Воспользовавшись формулой (4) и данными анализируемой выборки, определим величину

$$r = \frac{0,170 - 0,142}{0,176 - 0,142} = 0,823.$$

Критическое значение, найденное по таблице K приложения [9] при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе элементов выборки $n = 4$, равно $r_{0,05;4} = 0,765$ и не превышает опытного значения. Следовательно, второй раз имеются достаточные основания для того, чтобы исключить выброс $A = 0,142$ кг/(м² с^{0,5}) из рассмотренной выборки. При исключении этого результата нарушалось условие одинакового числа повторных опытов (элементов) в выборках и могли возникнуть определенные трудности при проведении статистического анализа. Поэтому вместо исключенного результата в выборку был включен новый результат $A = 0,166$ кг/(м² с^{0,5}), случайным образом отобранный из дополнительных повторных опытов.

Таким же способом были проанализированы остальные семь выборок. Оказалось, что при уровне значимости $\alpha = 0,05$ ни один из сомнительных результатов нельзя было признать в качестве выброса. Поэтому результаты опытов, представленные в таблице 1, будем считать однородными. Для всех выборок были определены средние арифметические значения и дисперсии, каждая из которых имеет $\nu = 3$ степени свободы. При визуальной оценке этих выборочных показателей в ряде случаев можно обнаружить заметную разницу, связанную с изменением температуры обжига или направления капиллярного впитывания воды. так при рассмотрении сред-

них значений коэффициента сорбции воды A , представленных на рисунке 2, видно, что повышение температуры обжига с 850°C до 1050°C при впитывании воды вдоль слоев текстуры материала приводит к снижению коэффициента A , а при впитывание воды поперек слоев зависимость коэффициента A от температуры практически отсутствует. Это свидетельствует о наличии взаимодействия варьируемых факторов. Изменение направления впитывания воды всегда вызывает заметное изменение значений коэффициента A .

Оценить значимость влияния варьируемых факторов можно, например, с помощью дисперсионного анализа, при выполнении которого предполагается, что дисперсии выборок однородны. Для проверки однородности дисперсий по m выборкам одинаковой численности n (степени свободы $\nu = n - 1$) используют наиболее точный критерий Кохрена. Выборочное значение критерия Кохрена равно отношению максимальной выборочной дисперсии к сумме всех дисперсий

$$G = S_{\max}^2 / \sum_{i=1}^m S_i^2. \quad (6)$$

Если значение G , найденное по формуле (6), окажется меньше табличного $G_{\alpha, m, \nu}$, то расхождения между дисперсиями нужно считать случайным при выбранном уровне значимости α .

Для коэффициента A согласно формулы (6) по четырем выборкам критерий Кохрена равен

$$G = \frac{488,7}{17,33 + 6,0 + 488,7 + 61,3} = 0,852$$

и при $\alpha = 0,05$ превышает критическое (табличное) значение $G_{0,05;4,3} = 0,684$. Следовательно, дисперсии нельзя считать однородными и использовать дисперсионный анализ не рекомендуется.

В таком случае можно воспользоваться процедурой сравнения двух дисперсий и двух средних. В нашем случае для каждого показателя капиллярного впитывания воды (A и W_k) необходимо сравнить по две пары значений дисперсий и средних. Однородность двух дисперсий проверялась с помощью критерия Фишера (F – критерий), представляющего собой отношение большей дисперсии к меньшей. Полученное значение дисперсионного отношения сравнивалось с критической (табличной) величиной F – критерия, найденной для выбранного уровня значимости α , степеней свободы большей ν_1 и меньшей ν_2 дисперсий (F_{α, ν_1, ν_2}). В дальнейшем уровень значимости α будем принимать равным 0,05.

Выполним сравнение дисперсий и средних для коэффициента A в первой и третьей выборки таблицы 1 (температура обжига 1050°C). Определяем дисперсионное отношение (F – критерий)

$$F = \frac{S_1^2}{S_3^2} = \frac{17,33}{6,0} = 2,89,$$

которое оказалось меньше критического значения $F_{\alpha, v_1, v_2} = F_{0,05;3;3} = 9,28$. Это означает, что сравниваемые дисперсии при $\alpha = 0,05$ не имеют значимого различия и, следовательно, не зависят от направления впитывания воды. Однородные дисперсии можно усреднить $S^2 = \frac{1}{2} \cdot (17,33 + 6,0) \cdot 10^{-6} = 11,67 \cdot 10^{-6}$.

Усредненная дисперсия S^2 имеет $v = 3 + 3 = 6$ степеней свободы и размерность A^2 .

В случае однородности дисперсий для сравнения двух средних применяется критерий Стьюдента (t – критерий). По данным первой и третьей выборок с учетом усредненной дисперсии вычисляем статистику

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_3}{\sqrt{S^2 \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_3} \right)}} = \frac{0,171 - 0,079}{\sqrt{11,67 \cdot 10^{-6} \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} \right)}} = 38,08,$$

(7)

которая значительно превышает критическое значение $t_{\alpha, v} = t_{0,05;6} = 2,45$, что свидетельствует о статистически значимом различии средних при $\alpha = 0,05$. В таком случае коэффициент сорбции воды A зависит от направления впитывания воды, что подтверждает очевидный факт наличие анизотропии у глиняных кирпичей пластического формования.

К таким же выводам пришли после анализа данных пятой и седьмой выборок (температура обжига 850°C). При $\alpha = 0,05$ дисперсии выборок признаны однородными и после усреднения имеем дисперсию $S^2 = 275 \cdot 10^{-6}$. Разница средних (0,277–0,076) оказалась статически значимой, так как вычисленное согласно формуле (7) значение $t = 12,88$ превышает табличное значение $t_{0,05;6} = 2,45$.

Следует отметить, что усредненные дисперсии при различных температурах обжига образцов (850°C и 1050°C) не являются однородными, так как их отношение

$$F = \frac{275,0}{11,67} = 23,56$$

значительно превышает критическое значение $F_{\alpha, v_1, v_2} = F_{0,05;6;6} = 4,28$. Следовательно, с повышением температуры обжига образцов от 850°C до 1050°C изменчивость коэффициента A уменьшается. Возможно неоднородность дисперсий коэффициента A при различных температурах обжига объясняется слишком малым значением дисперсии в третьей выборке $S_3^2 = 6 \cdot 10^{-6}$, когда температура обжига составляла 1050°C. При такой температуре согласно работы [10] изменчивость значений коэффициента A по семи пятиэлементным выборкам характеризуется дисперсией $S^2 = 79,5 \cdot 10^{-6}$ со степенями свободы $v = 28$, а также работы [11] дисперсия, найденная по четырем шестиэлементным выборкам ($v = 24$), равна $S^2 = 91,3 \cdot 10^{-6}$.

Проанализируем влияние температуры обжига на средние значения коэффициента A . Из таблица 1 или рисунка 2 видно, что при впитывании воды поперек слоев текстуры средние значения коэффициента A практически одинаковы (не зависят от температуры), а при впитывании воды вдоль слоев текстуры наблюдается заметная разница (выборки 1 и 5). При статистической проверке этой разницы нужно учитывать, что дисперсии в выборках не равны между собой. В этом случае воспользуемся приближенным t – критерием [8] и вычислим статистику

$$t = \frac{(\bar{x}_5 - \bar{x}_1) \sqrt{n}}{\sqrt{S_5^2 + S_1^2}} \quad (8)$$

с числом степеней свободы

$$v = \frac{n-1}{c^2 + (1-c)^2}, \quad (9)$$

где $c = S_5^2 / (S_5^2 + S_1^2)$. (10)

Используя данные выборок 1 и 5 по формулам (8), (9) и (10) находим

$$t = \frac{(0,277 - 0,171) \sqrt{4}}{\sqrt{(488,7 + 17,33) \cdot 10^{-6}}} = 4,98;$$

$$c = \frac{488,7}{488,7 + 17,33} = 0,966 \text{ и}$$

$$v = \frac{4-1}{0,966^2 + (1-0,966)^2} = 3,21.$$

После округления найденного v до целого числа имеем $v = 3$. При $\alpha = 0,05$ сравниваемые средние статистически значимо различаются, так как выборочное значение $t = 4,98$ превышает критическое значение $t_{0,05;3} = 3,18$. Следовательно, повышение температуры с 850°C до 1050°C приводит к существенному снижению значений коэффициента A , измеренных при впитывании воды вдоль слоев текстуры материала.

$A, \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}^{0,5})$

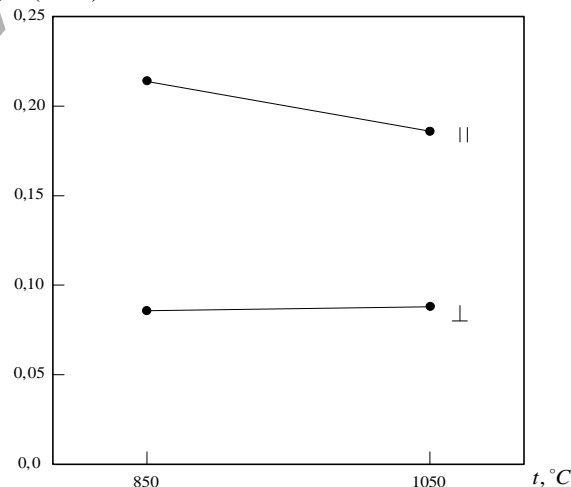


Рис. 2. Зависимость средних значений коэффициента сорбции воды A образцов глиняного кирпича от температуры обжига и направления впитывания воды

Таким образом, результаты статистического анализа подтвердили выводы, сделанные при визуальной оценке влияния варьируемых факторов на средние значения коэффициента сорбции воды A по рисунку 2.

Аналогичный статический анализ был выполнен и для средних значений влагосодержания W_k . С помощью критерия Кохрена установлено, что дисперсии всех четырех выборок являются однородными, так как вычисленная по формуле (6) статистика

$$G = \frac{713,41}{1095,74} = 0,651$$

при уровне значимости $\alpha = 0,05$, числе сравниваемых дисперсий $n = 4$ и одинаковом числе степеней свободы этих дисперсий $\nu = 3$ не превышает критического значения $G_{0,05;4;3} = 0,684$.

Усредненная по четырем выборкам дисперсия равна $S^2 = 273,9$ и имеет размерность w_k^2 . При сравнении средних значений \bar{w}_k оказалось, что и при температуре обжига 850°C и при 1050°C сравниваемые средние не имеют существенного различия при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Так, для наибольшей разницы средних значений \bar{w}_k выборках 6 и 8 (см. таблицу 1) с усредненной дисперсией

$$S^2 = \frac{1}{2}(116,54 + 713,41) = 414,97$$

($\nu = 6$) имеем статистику

$$t = \frac{295,6 - 268,2}{\sqrt{414,97 \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{4} \right)}} = 1,903,$$

которая меньше критического значения $t_{0,05;6} = 2,45$. Это значит, что влагосодержание материала в состоянии свободного капиллярного насыщения w_k (или активная пористость Φ_a) не зависит от направления впитывания воды. Далее этот вывод найдет подтверждение при анализе данных для известкового камня.

Для выяснения влияния температуры обжига на влагосодержание w_k были определены средние значения:

$$\text{при температуре } 850^\circ\text{C} \quad \bar{w}_k = \frac{1}{2}(295,6 + 268,2) = 281,9 \text{ кг/м}^3;$$

$$\text{при температуре } 1050^\circ\text{C} \quad \bar{w}_k = \frac{1}{2}(263,9 + 262,2) = 263,05 \text{ кг/м}^3.$$

Затем с помощью t – критерия при объединенной дисперсии $S^2 = 273,9$ ($\nu = 12$) была проверена нулевая гипотеза об отсутствии разницы между средними. В соответствии с формулой (7) вычислили статистику

$$t = \frac{281,9 - 263,05}{\sqrt{273,9 \left(\frac{1}{8} + \frac{1}{8} \right)}} = 2,28,$$

которая при уровне значимости $\alpha = 0,05$ оказалась больше критического значения $t_{0,05;12} = 2,18$. Поэтому нулевую гипотезу следует отвергнуть и признать, что с повышением температуры обжига от 850°C до 1050°C значения влагосодержания w_k (и активной пористостью Φ_a) уменьшаются. Это подтверждает общеизвестный факт, что повышение температуры обжига уменьшает пористость строительной керамики.

Анализ данных для известкового камня. Как уже отмечалось во введении наличие слоистой текстуры можно наблюдать у строительных камней из осадочных горных пород, используемых при возведении зданий и сооружений. Для подтверждения сказанного воспользуемся экспериментальными данными, полученными при изучении капиллярного переноса влаги во Французском оолитовом известняке (a French layered oolite limestone) и представленными в работе [12].

В работе [12] при определении основных гидравлических свойств материала было использовано 120 малых образцов размера $14 \times 14 \times 14$ мм, вырезанных из пластины известняка размера $180 \times 216 \times 14$ мм. Определение значений влагосодержания образцов в состоянии свободного капиллярного насыщения w_k и коэффициента сорбции воды A , характеризующих способность материала впитывать воду, было выполнено в направлении параллельном и перпендикулярном пласту залегания породы. В результате оказа-

лось, что средняя плотность образцов равна $1660,5 \text{ кг/м}^3$, влагосодержание в состоянии полного насыщения составило $w_{sat} = 381,9 \text{ кг/м}^3$ (открытая пористость $P = 38,19\%$), а в состоянии свободного капиллярного насыщения $w_k = 159,6 \text{ кг/м}^3$ (активная пористость $\Phi_a = 15,96\%$). Таким образом, доля открытой пористости, участвующая в капиллярном переносе влаги, в среднем составляет $\Phi_a / P = 0,412$. Для изделий стеновой керамики значение отношения Φ_a / P примерно в два раза больше. Отмечается значительная изменчивость всех измеряемых показателей. Так, значения коэффициента сорбции воды A в направлении параллельном поверхности пласта горной породы изменялись в пределах от $0,027$ до $0,383 \text{ кг/(м}^2 \text{ с}^{0,5})$ при среднем $A_{\parallel} = 0,085 \text{ кг/(м}^2 \text{ с}^{0,5})$, а в направлении перпендикулярном этот коэффициент изменял свои значения от $0,013$ до $0,295 \text{ кг/(м}^2 \text{ с}^{0,5})$ при среднем $A_{\perp} = 0,054 \text{ кг/(м}^2 \text{ с}^{0,5})$. Дисперсии этих случайных величин составляют: $S_{\parallel}^2 = 38,44 \cdot 10^{-4}$ и $S_{\perp}^2 = 14,44 \cdot 10^{-4}$, что на порядок и более превышает аналогичные дисперсии для образцов глиняного кирпича.

Распределения рассматриваемых случайных величин характеризуются асимметрией. Скорее всего это объясняется неоднородностью структуры образцов. С точки зрения анизотропии выделяются две группы образцов. В первой группе из 29 образцов, взятых из среднего слоя пластины, коэффициенты сорбции воды в направлении параллельном слою залегания породы A_{\parallel} и перпендикулярном направлению A_{\perp} имеют практически одинаковые значения. В этом случае текстуру можно характеризовать как беспорядочную. Текстуру остальных образцов (91 образец) следует отнести к слоистой, так в среднем значения A_{\parallel} в 2,1 раза превышает значения A_{\perp} .

Для проверки однородности двух дисперсий найдено их отношение

$$F = \frac{38,44}{14,44} = 2,66,$$

которое оказалось больше критического значения $F_{0,05;119;119} = 1,35$. Следовательно, при уровне значимости $\alpha = 0,05$ гипотеза об однородности дисперсий отвергается и признается, что $S_{\parallel}^2 > S_{\perp}^2$. Точно такой же результат был получен для образцов глиняного кирпича при температуре обжига 850°C .

Сравнение двух средних ($A_{\parallel} = 0,085$ и $A_{\perp} = 0,054$) при неоднородности дисперсий выполнено с использованием приближенного t – критерия. Согласно формул (8), (9) и (10) вычислена статистика $t = 4,67$ с числом степеней свободы $\nu = 197$, которая превышает критическое значение $t_{0,05;197} = 1,96$. В таком случае при $\alpha = 0,05$ разница средних признается статистически значимой и коэффициент сорбции воды A вдоль слоев осадочной горной породы существенно превышает значения этого коэффициента в перпендикулярном направлении ($A_{\parallel} > A_{\perp}$).

Для значений влагосодержания образцов известкового камня в состоянии свободного капиллярного насыщения в указанных взаимоперпендикулярных направлениях статистически значимой разницы не наблюдается. В подтверждение сказанному воспользуемся данными работы [12], представленными на рисунке 3 в виде корреляционного поля, характеризующего связь между максимальным влагосодержанием материала при впитывании вдоль слоев горной породы $w_{k\parallel}$ и перпендикулярно этим слоям $w_{k\perp}$. Из рисунка 3 видно, что точки корреляционного поля за исключением одного выброса очень тесно сгруппировались вдоль прямой, тангенс угла которой к оси $w_{k\parallel}$ и к оси $w_{k\perp}$ одинаков и равен единице. Из этого

следует, что влагосодержание анизотропного материала в состоянии капиллярного насыщения не зависит от направления впитывания воды, т.е. $W_{к\parallel} = W_{к\perp}$. Поскольку такой же вывод был сделан для образцов глиняного кирпича обожженных при температуре 850°C и 1050°C, то имеются основания распространить его и на другие стропильные материалы. Это позволяет упростить процедуру определения коэффициента анизотропии капиллярного переноса влаги строительных материалов.

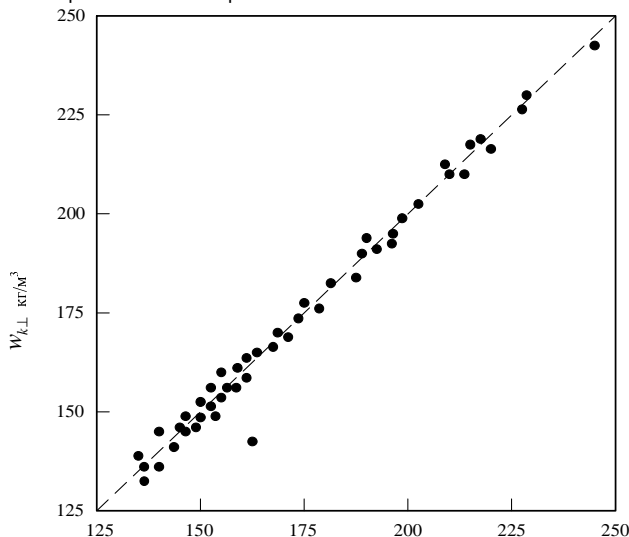


Рис. 3. Взаимная связь влагосодержания образцов в состоянии капиллярного насыщения при впитывании воды вдоль $W_{к\parallel}$ и поперек $W_{к\perp}$ слоев текстуры

Определение коэффициента анизотропии. Как уже отмечалось, для определения коэффициента анизотропии K_a керамического материала с точки зрения капиллярного влагопереноса предполагается использовать формулу (1), согласно которой значение K_a равно отношению коэффициента переноса жидкой влаги в направлении параллельном слоям текстуры $D_{w\parallel}$ и в направлении перпендикулярном этим слоям $D_{w\perp}$. Формула (1) применима и для других строительных материалов при условии, что у них капиллярный влагоперенос играет заметную роль. Определение коэффициента D_w целесообразно выполнять с помощью достаточно точной и теоретически обоснованной зависимости [6]

$$D_w = \frac{2 \xi^2(w_k) \cdot b(s)}{M \xi(w)} \quad (11)$$

где $\xi(w)$ – извилистость капилляров, заполненных жидкой влагой ($w \leq w_k$);

$b(s)$ – безразмерная функция, зависящая от отношения $s = w / w_k$, характеризующего степень насыщения активной пористости Φ_a жидкой влагой;

$$M = \left(\frac{w_k}{A} \right)^2 \text{ – сопротивление капиллярному впитыванию}$$

воды.

Определение коэффициента D_w по формуле (11) связано с трудностями экспериментального и вычислительного характера. В данной работе доказано, что влагосодержание материала в состоянии свободного капиллярного насыщения не зависит от направления

капиллярного впитывания воды и справедливо равенство $W_{к\parallel} = W_{к\perp} = W_k$. В таком случае приходим к еще одному равенству

$$\frac{D_{w\parallel}}{D_{w\perp}} = \left(\frac{A_{\parallel}}{A_{\perp}} \right)^2 \quad (12)$$

позволяющему при вычислении коэффициента анизотропии K_a вместо трудно определяемого коэффициента переноса жидкой влаги D_w использовать довольно просто измеряемый коэффициент сорбции воды A . Окончательно имеем:

$$K_a = \left(\frac{A_{\parallel}}{A_{\perp}} \right)^2 \quad (13)$$

Согласно формуле (13) и данным таблицы 1 установлено что среднее значение коэффициента анизотропии при средних значениях A_{\parallel} и A_{\perp} для глиняного кирпича пластического формования обожженного при температуре 850°C составляет $K_a = 8,92$. Повышение температуры обжига до 1050°C приводит к снижению значения этого коэффициента до $K_a = 4,69$. Среднее значение коэффициента анизотропии рассмотренной пластины известняка равно $K_a = (0,085 / 0,054)^2 = 2,48$. Отметим, что коэффициент анизотропии является случайной величиной, так как определяется из соотношения (13) (косвенное измерение), включающего две случайные величины, измеряемые непосредственно.

Дисперсию косвенно измеряемого коэффициента K_a можно найти по закону сложения дисперсий [8]:

$$S_{K_a}^2 = \left(\frac{dK_a}{dA_{\parallel}} \right)^2 \cdot S_{A_{\parallel}}^2 + \left(\frac{dK_a}{dA_{\perp}} \right)^2 \cdot S_{A_{\perp}}^2 \quad (14)$$

Это выражение еще называют законом накопления ошибок. С учетом формулы (13) согласно выражения (14) получим

$$S_{K_a}^2 = \frac{4K_a}{A_{\perp}^2} \left(S_{\parallel}^2 + K_a S_{\perp}^2 \right) \quad (15)$$

Так как S_{\parallel}^2 и S_{\perp}^2 имеют размерность A^2 , то $S_{K_a}^2$ является безразмерной величиной.

Согласно формулы (15) для образцов глиняного кирпича найдены следующие значения дисперсий:

обжиг при 850°C –

$$S_{K_a}^2 = \frac{4 \cdot 8,92}{0,076^2} (488,7 + 8,92 \cdot 61,3) 10^{-6} = 6,397 \text{ с}$$

числом степеней свободы $\nu = 3$;

обжиг при 1050°C –

$$S_{K_a}^2 = \frac{4 \cdot 4,69}{0,079^2} (17,33 + 4,69 \cdot 6,0) 10^{-6} = 0,137 \text{ с чис-}$$

лом степеней свободы $\nu = 3$.

Эти дисперсии являются неоднородными.

Для выборки ($n = 120$) образцов известкового камня дисперсия равна:

$$S_{K_a}^2 = \frac{4 \cdot 2,48}{0,054^2} (38,44 + 2,48 \cdot 14,44) 10^{-6} = 25,26 \text{ с}$$

числом степеней свободы $\nu = n - 1 = 119$.

Сейчас имеется возможность проверить различные гипотезы. Например, сравнить средние и оценить значимость влияния технологических факторов на коэффициент анизотропии; проверить строительное изделие на наличие (отсутствие) изотропии и т.д. Представляло интерес сравнить средние значения коэффициента K_a для образцов глиняного кирпича обожженных при температуре 850°C и 1050°C. Расчетами с использованием формул (8), (9) и (10) установлено, что при $\alpha = 0,05$ разница средних является статически значимой и, следовательно, повышение температуры обжига приводит к существенному снижению значения коэффициента анизотропии.

Можно также проверить наличие (отсутствие) разницы между случайным значением коэффициента $K_a = 2,48$ для известкового камня (или другого материала) принимаемого в качестве анизотропного материала, и постоянным значением (математическое ожидание) $K_a = 1$ для гипотетического материала. В этом случае используем случайную величину

$$t = \frac{(K_a - 1)\sqrt{n}}{\sqrt{S_{K_a}^2}}, \quad (16)$$

которая имеет распределение Стьюдента с числом степеней свободы $\nu = n - 1$. В рассматриваемом случае согласно формулы (16) имеем

$$t = \frac{(2,48 - 1)\sqrt{120}}{\sqrt{25,26}} = 3,296 > t_{0,05;119} = 1,98.$$

При таком соотношении проверяемая разница оказалась статически значимой, поэтому известковый камень следует считать анизотропным материалом. К такому же выводу пришли после использования формулы (16) и данных для образцов глиняного кирпича.

Если факт наличия анизотропии изделий из капиллярно-пористых материалов установлен, то эти изделия нужно располагать (укладывать) в наружных стенах зданий таким образом, чтобы обеспечивалось наибольшее сопротивление капиллярному впитыванию дождевой влаги.

Заключение. Выполнен статистический анализ опытных значений коэффициента сорбции воды A и влагосодержания материала в состоянии свободного капиллярного насыщения W_k , описывающих кинетику одномерного впитывания воды образцами глиняного кирпича и известкового камня в направлении параллельном и перпендикулярном слоям текстуры. Для обоих материалов установлена статистически значимая зависимость коэффициента A от направления впитывания воды. Такой зависимости нельзя признать для влагосодержания W_k . Кроме того, для образцов глиняного кирпича статистический (формальный) анализ подтвердил известную (неформальную) оценку влияния температуры обжига на выборочные значения коэффициента A и влагосодержания W_k .

Для любого образца капиллярно-пористого материала было обосновано равенство значений влагосодержания W_k при впитывании воды вдоль и поперек волокон текстуры материала и, следовательно, в произвольном направлении. Это равенство позволило упростить существующую зависимость для определения коэффици-

ента анизотропии K_a , показывающего во сколько раз значение коэффициента влагопроводности D_w вдоль слоев текстуры материала превышает значение этого коэффициента поперек слоев текстуры. Упрощение заключается в том, что при вычислении коэффициента анизотропии K_a вместо трудно определяемого коэффициента влагопроводности D_w используется довольно просто измеряемый коэффициент сорбции воды A .

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ali, A.R. Wplyw opadów atmosferycznych oraz parametrów przemieszczania wilgoci materiałów konstrukcji osłonowych na ich wilgotność / A.R.Ali, V.Nikitin, V.Kofanov. // Materiały Budowlane. – 2005. – № 12. – S. 34–36.
2. Witczak, K. Wplyw zacinającego deszczu na stan wilgotnościowy przegrod budowlanych w Polsce / K. Witczak, H.M. Kunzel, G. Gawin // XLIX Konf. Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB "Krynica 2003" / Warszawa-Krynica, 14–19 września 2003 / Politechnika Warszawska, Warszawa. – 2003. – T. IV. – S. 99–106.
3. Blocken, B.J. A review of wind-driven rain research in building science / B.J. Blocken, J.E. Carmeliet // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2004. – № 92 (13). – P. 1079–1130.
4. Hydrothermal performance of building components and building elements: EN 15026:2007. – Assessment of moisture transfer by numerical simulation.
5. Никитин, В.И. Об учете косоугольного дождя и капиллярных свойств материалов при оценке влагосодержания ограждающих конструкций / В.И. Никитин, В.А. Кофанов // Вестник БрГТУ. – 2013. – № 1: Стр-во и арх-ра. – С. 91–95.
6. Никитин, В.И. Влияние анизотропии изделий строительной керамики на показатели капиллярного влагопереноса / В.И.Никитин, В.А.Кофанов // Вестник БрГТУ. – 2012. – № 1: Стр-во и арх-ра. – С. 132–136.
7. Никитин, В.И. Метод оценки коэффициента влагопереноса строительных материалов / В.И. Никитин, В.А. Кофанов // Вестник ПГУ. – 2011. – № 8: Прикладные науки. Строительные материалы. – С. 57–63.
8. Ахназарова, С.Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии / С.Л. Ахназарова, В.В. Кафанов. – М.: Высшая школа, 1985. – 327 С.
9. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Н. Джонсон, Ф. Лион; пер. с англ. под ред. Э.К. Лецкого. – М.: Мир, 1980. – 512 С.
10. Nikitin, V. Wplyw parametrów procesu wypalania na wskaźniki podciągania kapilarnego wody w tworzywach ceramicznych / V.Nikitin, B. Backiel – Rzożowska, M. Boltryk // Ceramica / Ceramics. – 2005. – Vol. 91. – S. 1223–1230.
11. Mukhopadhyaya, P. Effect of surface temperature on water absorption coefficient of building materials/ P. Mukhopadhyaya, K. Kumaran, N. Ncmmandin, P. Goudreau // Journal of Thermal Envelope and Building Science. – 2002 – V.26 – № 2 – P. 179–195.
12. Roels, S. Modelling unsaturated moisture transport in heterogeneous limestone / S.Roels. –Katholik Universiteit Toegaste Wetensehappen Arebergkaseel. B-3001 Lenven (Belgium). – 2000. – 211 p.

Материал поступил в редакцию 23.01.15

NIKITIN V.I., BACKIEL-BRZOZOWSKA B. Of taking into account the anisotropy of the wall materials in calculating the capillary imbibition of moisture rain

A statistical analysis of data on the kinetics of water imbibition one-dimensional samples of clay brick and limestone in the direction perpendicular to the layers of texture and running in parallel. On this basis developed a simplified method for the determination coefficient anisotropic wall materials.