

На рисунке 6 показано изменение прочности на сжатие образцов испытанных составов. Как видно из рисунка 6 образцы составов 1 и 2 показали минимальную прочность. Это следует вероятно связывать с увеличением водо-вяжущего отношения. Прочность образцов пятого состава оказалась наибольшая, но она незначительно отличается от прочности образцов четвертого состава.

#### Заключение

На основании выполненных исследований можно заключить, что наиболее оптимальным из исследованных составов является раствор состава 4. Объемное отношение цемента к наполнителю в нем равно 1,7. Данный состав, имея необходимые реологические характеристики, показал относительно высокую прочность и самонапряжение. Прирост прочности и самонапряжения образцов состава 5 незначителен по сравнению с составом 4, зато подвижность смеси при требуемой вязкости наиболее низкая, что ограничивает возможность применения данного состава. Прочность образцов состава 4 на 18% ниже, чем у образцов базового состава. Это объясняется влиянием доломитового наполнителя и в/ц на снижение прочности.

Для получения самоуплотняющихся бетонов с малым расходом напрягающего цемента и обеспечивающих компен-

УДК 691.4:536.486

**Никитин В.И., Болтрык М., Бацкель-Бжозовска Б.**

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ФОРМОВОЧНОЙ СМЕСИ И РЕЖИМОВ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ НА МОРОЗОСТОЙКОСТЬ СТЕНОВОЙ КЕРАМИКИ

### 1. Введение

В настоящее время долговечность изделий стеновой керамики, эксплуатируемых в условиях агрессивного воздействия внешней среды, обычно оценивается значением показателя ее морозостойкости. При этом под морозостойкостью понимается способность материала в насыщенном водой состоянии выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание без видимых признаков разрушения. Способность материала сопротивляться такому воздействию зависит от различных факторов, среди которых большое значение имеет характер его капиллярно-пористой структуры. Чем лучше капиллярно-пористая структура материала компенсирует неблагоприятные воздействия, связанные с внутренним перемещением влаги в парообразном, жидком и твердом состояниях, тем выше показатель морозостойкости изделий из этого материала. На формирование пористой структуры керамического материала существенно влияет состав сырьевой смеси и условия обжига изделий. При наличии количественной оценки влияния этих факторов на показатель морозостойкости материала появляется возможность прогнозировать значения этого показателя в ходе технологического процесса. В данной работе на основе результатов специально спланированного эксперимента построена полиномиальная модель позволяющая во взаимодействии оценить влияние содержания и гранулометрии добавки кварцевого песка в керамической массе, максимальной температуры обжига и продолжительности ее действия на показатель морозостойкости керамических образцов.

### 2. Оценка момента отказа образцов по морозостойкости

Испытания керамического материала на морозостойкость

сированную усадку, в первом приближении следует принять объемное соотношение напрягающего цемента к доломитовому наполнителю в пределах от 0,8 до 1,1. Согласно [3] водо-вяжущее значение традиционных самоуплотняющихся бетонов на портландцементе лежит в пределах 0,9...1,1.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Proske, T.: Self-Compacting Concrete - pressure on formwork and ability to deaerate. Darmstadt Concrete 17 (2002). <http://www.darmstadt-concrete.de/2002/deaerate.html>
2. Sachstandsbericht Selbstverdichtender Beton (SVB) – Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin 2001, s 107
3. Selbstverdichtender Beton (SVB) mit EFA-Füller® als Betonzusatzstoff Bindemittelkomponente (Berechnungs- und Prüfverfahren zur Betonzusammensetzungselbstverdichtender Betone (SVB)) - BauMineral GmbH Information, URL: [www.bauminerall.de](http://www.bauminerall.de). 2000
4. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete - EFNARC, URL: [www.efnarc.org](http://www.efnarc.org). 2002
5. СТБ 1335-2002 Цемент напрягающий. Технические условия.
6. Кардунян Г.С. Эффективность модифицирования напрягающих бетонов комплексной добавкой микрокремнезема и суперпластификатора. / Вестник БГТУ №1, 2001 г.

осуществлялись в лабораторных условиях на образцах пластического формования в виде куба со стороной 50 мм. Подробная характеристика гранулометрического и химического составов глинистого сырья, а также состава формовочной смеси приведена в предыдущей работе [1].

Перед началом испытаний водонасыщенные образцы устанавливались в специальные гидро- и теплоизолирующие стаканы в соответствии с рисунком 1, что позволяло в процессе замораживания (оттаивания) отводить (подводить) тепло преимущественно с открытой поверхности (границы) кубического образца и создать условия близкие к одностороннему замораживанию (оттаиванию). Теплоизолирующие стаканы были изготовлены из пенополистирола и имели стенку толщиной 25 мм. Замораживание водонасыщенных образцов проводилось в климатической камере МК 720 Binder при температуре  $-18^{\circ}\text{C}$ . Продолжительность замораживания составляла не менее 4 часов. Оттаивание теплоизолированных образцов происходило при температуре воздуха  $+20^{\circ}\text{C}$ . При оттаивании открытая поверхность образцов находилась под слоем воды. Один цикл замораживания и оттаивания заканчивался через 24 часа.

При стандартных испытаниях морозостойкость изделий стеновой керамики характеризуется числом циклов одностороннего или объемного попеременного замораживания и оттаивания отработанных изделиями до отказа в указанном режиме. Момент отказа фиксируется после обнаружения на поверхности изделий повреждений в виде шелушения, выкрашивания, расслоения, специфических трещин. Шелушение и отколы на поверхности керамических изделий в кладке наружных стен зданий являются первыми признаками разрушения материала. Этот вид повреждений должен служить ос-

**Никитин Вадим Иванович.** Д.т.н., профессор Политехнической Белостокской (ZBW), Польша.

**Болтрык Михал.** Д.т.н., профессор Политехнической Белостокской, Польша.

**Бацкель-Бжозовска Беата.** Магистр-инженер Политехнической Белостокской, Польша.

новным критерием при оценке результатов испытаний изделий стеновой керамики на морозостойкость. Следует отметить, что все упомянутые повреждения дают довольно размытую оценку момента отказа.

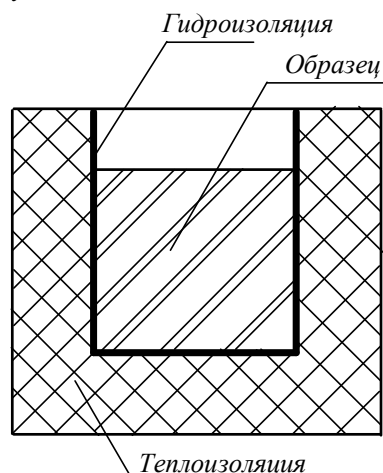


Рис. 1. Керамический образец для испытаний на морозостойкость.

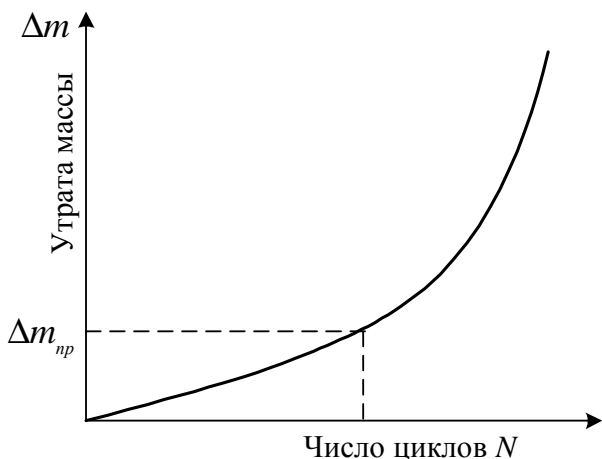


Рис. 2. Зависимость утраты массы образцов от числа циклов замораживания и оттаивания.

В данной работе деструктивные процессы, происходящие в материале при попеременном замораживании и оттаивании, отслеживались по утрате массы образцов с открытой поверхности в результате шелушения и выкрашивания. Оказалось, что при отслеживании потери массы образцов с открытой поверхности  $\Delta m$  (кг/м<sup>2</sup>) можно было наблюдать процесс утраты массы первоначально по линейной, а затем по нелинейной зависимости в соответствии с рисунком 2. На этой основе была принята гипотеза о существовании области линейного накопления повреждений при рассматриваемых циклических воздействиях. Широко известный принцип линейного суммирования повреждений [2, 3] соблюдался примерно до значения  $\Delta m = 0,25$  кг/м<sup>2</sup>. Последующие циклические воздействия приводили к заметному увеличению скорости утраты массы и разрыхлению структуры материала вплоть до полного разрушения образцов.

Применительно к поверхностной эрозии материала при циклических испытаниях на морозостойкость математическая формулировка принципа линейного накопления повреждений может иметь вид

$$\Delta m = cN, \quad (1)$$

где  $c$  – случайный коэффициент пропорциональности, характеризующий интенсивность потери массы испытываемого образца;

$N$  – число циклов попеременного замораживания и оттаивания образцов.

Справедливость принципа линейного суммирования повреждений в определенных границах для керамических материалов наглядно подтверждается также данными работы [4], в которой приведены результаты испытаний образцов, изготовленных из различных глин, на морозостойкость до полного их разрушения.

В качестве предельной величины утраты массы с открытой поверхности образцов нами было принято значение  $\Delta m_{кр} = 0,2$  кг/м<sup>2</sup>. Моменту отказа образца соответствовал номер цикла (отработанное число циклов), после которого утрата массы с открытой поверхности образца достигала или немного превышала предельное значение  $\Delta m_{кр}$ .

При выбранном значении предельной утраты массы  $\Delta m_{кр}$ , по которой оценивался момент отказа, доля поверхностной эрозии не превышала 20 % и ухудшение декоративных свойств поверхности образцов с расстояния 2 м было практически незаметным. При сравнении 11 пар образцов (один образец в паре является контрольным, а другой образец прошел испытания до  $\Delta m_{кр}$ ) установлено, что среднее снижение прочности образцов при сжатии составило лишь 7 %.

### 3. Модель, план и результаты эксперимента

С помощью данных спланированного эксперимента выполнено построение полиномиальных моделей, позволяющих количественно оценить влияние на морозостойкость керамических образцов максимальной температуры обжига (фактор  $X_1$ , варьируемый на трех уровнях: 900, 990 и 1080 °C), продолжительности выдержки при максимальной температуре обжига (фактор  $X_2$ , на уровне 1, 2 и 3 час.), содержания добавки кварцевого песка в сырьевой смеси (фактор  $X_3$ , на уровне 5, 15 и 25 % по массе) и гранулометрического состава этой добавки задаваемого долями фракций:

- мелкой  $Z_1$  с размером зерен не более 0,25 мм;
- средней  $Z_2$  с зернами от 0,25 до 0,5 мм;
- крупной  $Z_3$  с зернами от 0,5 до 1 мм.

При этом соблюдалось условие  $\sum_{i=1}^3 Z_i = 1$ .

Как и ранее [1] зависимость морозостойкости  $M$  от факторов  $X_1, X_2$  и  $X_3$  описывалась полиномом второго порядка

$$M = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (2)$$

где  $x_1 = \frac{X_1 - 990}{90}$ ;  $x_2 = X_2 - 2$ ,  $x_3 = \frac{X_3 - 15}{10}$  – кодированные (безразмерные) факторы, имеющие для выбранных уравнений натуральных факторов  $X_i$  значения – 1, 0 и +1.

Предполагалось, что каждый коэффициент полинома (2) зависит от факторов  $Z_i$ . Для описания этой зависимости использовался приведенный полином неполного третьего порядка

$$b_{(0,i,ij,ii)} = \beta_1Z_1 + \beta_2Z_2 + \beta_3Z_3 + \beta_{12}Z_1Z_2 + \beta_{13}Z_1Z_3 + \beta_{23}Z_2Z_3 + \beta_{123}Z_1Z_2Z_3, \quad (3)$$

( $i, j = 1, 2, 3; ij, i < j$ ).

Таблица 1. План и результаты эксперимента по определению морозостойкости образцов ( $M$ , циклы)

№ опыта	$X_1, ^\circ\text{C}$	$X_2, \text{ч}$	$X_3, \%$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_1, Z_2$	$Z_1, Z_3$	$Z_2, Z_3$	$Z_1, Z_2, Z_3$
				1	1	1	1/2, 1/2	1/2, 1/2	1/2, 1/2	1/3, 1/3, 1/3
1	1080	1	5	44	28	27	32	40	32	28
2	900	1	5	22	11	11	14	21	18	14
3	1080	3	5	50	49	34	40	42	42	42
4	900	3	5	24	15	13	14	14	21	15
5	1080	1	25	56	43	32	50	45	36	44
6	1080	1	25	28	20	21	23	18	15	16
7	900	3	25	56	44	29	49	43	32	46
8	1080	3	25	35	23	18	22	17	16	16
9	900	2	15	22	17	14	25	22	12	17
10	1080	2	15	53	42	29	46	42	40	42
11	990	1	15	45	41	19	40	28	28	25
12	990	3	15	38	32	18	33	28	32	23
13	990	2	5	35	27	24	27	30	28	24
14	990	2	25	52	41	20	38	24	24	33

Для оценки коэффициентов полинома (2) был выбран план эксперимента В3, включающий  $N=14$  опытов [5]. Каждый опыт этого плана выполнялся семь раз при различных соотношениях фракций песка  $Z_i$ , задаваемых симплекс-решетчатым планом [5], который позволял оценить коэффициенты полинома (3). Полученный план эксперимента и его результаты представлены в таблице 1. Из этой таблицы видно, что опытные данные по столбцам и строкам изменяются примерно в 2-3 раза. Следовательно факторы  $X_i$  и  $Z_i$  могут иметь статически значимые эффекты.

**4. Статистический анализ результатов эксперимента**

При испытании образцов на морозостойкость повторные опыты не проводились. Поэтому для оценки дисперсии ошибки (воспроизводимости) эксперимента в соответствии с рекомендациями работы [6] выполнялся анализ остатков. Для любого  $u$ -того опыта остаток  $e_u$  определялся как разница между наблюдаемым в этом опыте значением морозостойкости  $M_u$  и значением  $\hat{M}_u$ , вычисленным с помощью регрессионной модели вида (2).

Полиномиальные модели (2) строились по опытным данным таблицы 1 для каждого из семи ее столбцов. Для каждой из семи полученных моделей вычислялись остатки  $e_u$ , которые откладывались в виде эмпирического кумулятивного распределения на нормальной сетке 14 остатков. В качестве примера на рисунке 3 приведено это распределение для модели вида (2), коэффициенты которой оценивали по данным 14 опытов столбца  $Z_1 = 1$  таблицы 1. Если бы остатки расположились на прямой линии, то их распределение было бы строго нормальным. Из рисунка 3 видно, что набор из 14 остатков расположился около прямой линии довольно близко. На этой основе можно считать, что полученное эмпирическое кумулятивное распределение остатков является близким к нормальному. Тогда можно принять, что точки пересечения наклонной прямой линии с вертикальными пунктирными линиями ограничивают интервал удвоенного стандартного отклонения  $2\sigma$ . В данном случае точки пересечения наклонной прямой линии с вертикальными пунктирными линиями находятся примерно на уровнях  $\pm 2,9$ . Поэтому в качестве оценки стандартного отклонения (ошибки эксперимента) было принято значение  $s_M = 2,9$  с четырьмя степенями свободы.

По такой же схеме были проанализированы опытные данные остальных шести столбцов таблицы 1 и получено еще шесть оценок ошибки эксперимента. Выяснилось, что столб-

цовые оценки ошибки эксперимента по критерию Кохрена при выбранном уровне значимости  $\alpha = 0,05$  являются однородными и их можно усреднить. Усредненная оценка ошибки эксперимента оказалась равной  $s_M = 2,67$  при 28 степенях свободы.

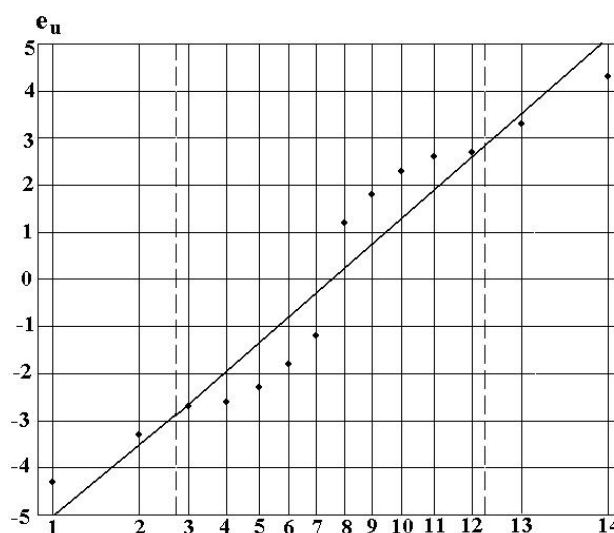


Рис 3. Эмпирическое кумулятивное распределение остатков  $e_u$  для уравнения (2), построенного по данным столбца  $Z_1 = 1$

При наличии оценки ошибки эксперимента появилась возможность оценить значимость коэффициентов семи полиномиальных моделей вида (2) с помощью критерия Стьюдента. При уровне значимости  $\alpha = 0,05$ , дисперсии ошибки эксперимента  $s_M^2 = 7,13$ , основанной на 28 степенях свободы, и критерии Стьюдента  $t_{0,05,28} = 2,05$  установлено, что из десяти коэффициентов семи полиномов вида (2) статически значимыми можно признать только четыре из них:  $b_0, b_1, b_3, b_{11}$ . Для регрессионных моделей, включающих значимые коэффициенты, снова был выполнен анализ остатков и получена уточненная оценка ошибки эксперимента, равная  $s_M = 2,42$  с 70 степенями свободы. Новая оценка  $S_M$  не внесла изменений в количество значимых коэффици-

ентов полинома (2). Сопоставление эмпирических и табличных значений критерия Фишера показало, что окончательные полиномы достаточно точно аппроксимируют опытные данные. Статистически значимые коэффициенты полиномов, отражающие эффекты факторов  $X_1$  и  $X_3$ , свидетельствуют о том, что морозостойкость керамических образцов увеличивается с повышением температуры обжига и содержания кварцевого песка в сырьевой смеси. Однако значения коэффициентов (включая  $b_0$ ) меняются с изменением грансостава песка.

После аппроксимации значимых коэффициентов уравнений вида (2) полиномами (3) итоговая формула для определения морозостойкости образцов имеет следующий вид:

$$M = 42,5Z_1 + 33,3Z_2 + 21,8Z_3 - 13,6Z_1Z_2 - 12,2Z_1Z_3 - 4,2Z_2Z_3 - 21,6Z_2Z_3 + (12,8Z_1 + 11,6Z_2 + 1,3Z_3 - 2,4Z_1Z_2 + 7,0Z_1Z_3 + 12,3Z_1Z_2Z_3)x_1 + (5,2Z_1 + 4,0Z_2 + 1,4Z_3 + 1,6Z_1Z_2 - 13,2Z_1Z_3 - 10,8Z_2Z_3 + 50,1Z_1Z_2Z_3)x_3 + (-3,5Z_1 - 4,3Z_2 + 7,0Z_1Z_3 + 8,5Z_2Z_3 + 21,2Z_1Z_2Z_3)x_1^2. \quad (4)$$

В рассмотренной области факторного пространства максимальную морозостойкость образцы имеют при температуре обжига  $X_1 = 1080^\circ C$  ( $x_1 = +1$ ) и содержании добавки песка в сырой смеси  $X_3 = 25\% C$  ( $x_3 = +1$ ). После подстановки кодированных значений факторов  $x_1 = +1$  и  $x_3 = +1$  в уравнение (4) получим:

$$M_M = 57,0Z_1 + 44,7Z_2 + 30,5Z_3 - 14,42Z_1Z_2 - 11,4Z_1Z_3 - 6,5Z_2Z_3 + 62,2Z_2Z_3. \quad (5)$$

Уравнение (5) позволяет расчетным путем уточнить максимальное значение морозостойкости образцов в зависимости от гранулометрического состава вводимого песка, размер зерен которого не превышает 1 мм. На рисунке 4а показан геометрический образ зависимости (5) в виде линий равного уровня морозостойкости образцов на трехкомпонентной диаграмме. Из этой диаграммы следует, что при температуре обжига  $X_1 = 1080^\circ C$  наибольшего значения морозостойкости достигают образцы изготовленные из керамической массы с 25%-ной добавкой кварцевого песка, у которого доля мелкой фракции  $Z_1$ , характеризуемой зернами размера не более 0,25 мм, стремится к единице.

Ранее нами было установлено [1], что наибольшую прочность при сжатии имеют образцы изготовленные из керамической массы с добавкой кварцевого песка  $X_3 = 12,5\%$  ( $x_3 = -0,25$ ) и обожженные при температуре  $X_1 = 900^\circ C$  ( $x_1 = -1$ ). Подстановка значений  $x_1 = -1$  и  $x_3 = -0,25$  в уравнение (4) привела к зависимости такого вида

$$M_R = 24,9Z_1 + 16,5Z_2 + 14,22Z_3 - 11,6Z_1Z_2 - 8,9Z_1Z_3 + 7,0Z_2Z_3 - 25,2Z_1Z_2Z_3. \quad (6)$$

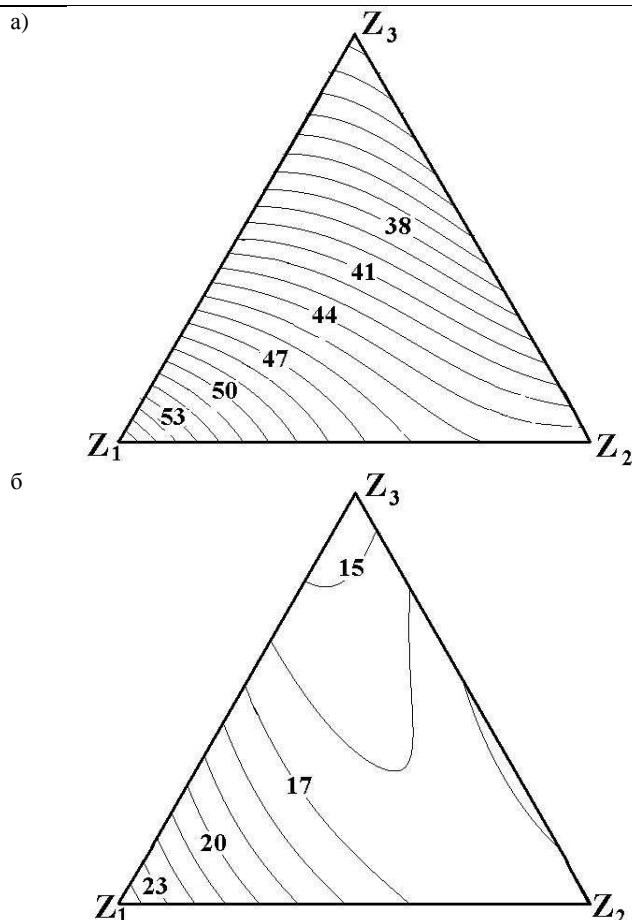


Рис. 4. Изолинии значений морозостойкости образцов на смеси в треугольнике (гранулометрия песка) для оптимальных уровней факторов  $X_1$  (температура обжига) и  $X_3$  (содержание песка);

а) с точки зрения морозостойкости ( $X_1 = 1080^\circ C$ ,  $X_3 = 25\%$ ),

б) с точки зрения прочности при сжатии ( $X_1 = 900^\circ C$ ,  $X_3 = 12,5\%$ ).

Линии равного уровня (изолинии) морозостойкости образцов на трехкомпонентной диаграмме, построены с помощью уравнения (6), показаны на рисунке 4б. Из рисунка 4б видно, что и в данном случае ( $X_1 = 900^\circ C$  и  $X_3 = 12,5\%$ ) наибольшие значения морозостойкости имеют образцы изготовленные из керамической массы, включающей кварцевый песок (фактор  $X_3$ ) преимущественно мелкой фракции  $Z_1$ .

При сопоставлении рисунков 4а и 4б выясняется, что определение оптимальных значений фактора  $X_1$  (максимальная температура обжига) и фактора  $X_3$  (содержание добавки кварцевого песка в сырьевой смеси) связано с поиском компромиссных решений, учитывающих приоритет прочности или морозостойкости образцов.

В литературе [7, 8] отмечается, что по показателям относительного изменения линейных размеров керамических образцов при насыщении водой можно прогнозировать их морозостойкость. Поскольку определение изменений линейных размеров образцов при насыщении водой не требует значительных временных затрат и отличается простотой, представляло интерес проверить наличие связи между этим показателем и морозостойкостью образцов на основе рассмотренного глинистого сырья. С этой целью из керамической массы, со-

держашей 15% добавки кварцевого песка гранулометрического состава  $Z_1 = Z_2 = Z_3 = \frac{1}{3}$ , было изготовлено 24 образца.

Максимальная температура обжига 7 образцов составляла  $900^{\circ}\text{C}$ , 10 образцов –  $990^{\circ}\text{C}$  и остальных 7 образцов –  $1080^{\circ}\text{C}$ . Скорость нагревания и охлаждения образцов как и раньше не менялась и поддерживалась на уровне  $3^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ . После обжига образцы 10 суток выдерживались в воде с отслеживанием изменения линейных размеров и испытывались на морозостойкость по принятой нами методике.

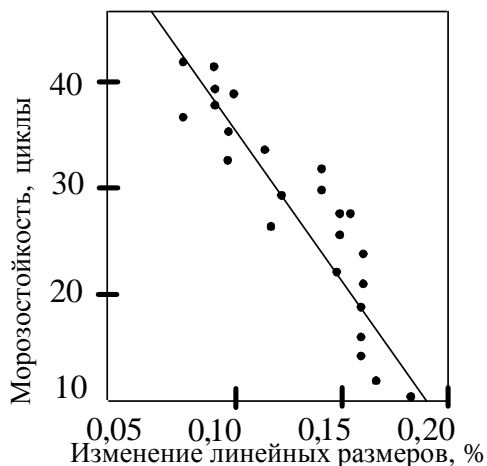


Рис. 5. Зависимость значений морозостойкости образцов от изменения их линейных размеров при насыщении водой.

Оказалось, что после 7 - 8 суток выдерживания в воде набухание образцов практически прекратилось. Далее рассматривались только максимальные значения изменения линейных размеров образцов при насыщении водой. Значения этого показателя уменьшались с увеличением температуры обжига. Результаты измерений изменения линейных размеров и значений морозостойкости 24 образцов представлены на рисунке 5, из которого видно, что морозостойкость образцов увеличивается с уменьшением их относительного изменения линейных размеров при насыщении водой примерно по линейной зависимости. Теснота линейной связи между значениями этих показателей характеризуется отрицательным коэффициентом корреляции, равным  $-0,946$ .

Наличие такой связи может служить основой для разработки методики оценки морозостойкости керамических образцов по показателям изменения их линейных размеров при насыщении водой. Для проверки устойчивости связи между

упомянутыми показателями целесообразны дальнейшие специальные исследования.

## 5. Заключение

Результаты выполненной работы показывают, что на значения морозостойкости стеновой керамики, определяемые по утрате массы в рамках принципа линейного суммирования повреждений, существенно влияют не только условия тепловой обработки и содержание кварцевого песка в сырьевой смеси, но и гранулометрический состав этого песка. Подтверждено наличие связи между значениями морозостойкости керамических образцов и их относительным изменением линейных размеров при насыщении водой, упрощающей методику эмпирического оценивания морозостойкости стеновой керамики. Полученные экспериментально-статистические модели достаточно точно отражают опытные данные и позволят решать различные инженерные задачи, например, прогнозировать морозостойкость изделий стеновой керамики на стадии их изготовления.

Исследование выполнено в рамках работ S/II В/1/02 и W/IIВ/1/03 Политехники Белостокской

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Никитин В.И., Болтрык М., Бацкель-Бжозовска Б. Влияние режимов обжига, содержания добавки песка и его грансостава на физико-механические свойства стеновой керамики// Вестник БГТУ. Строительство и архитектура.-2003, №1(19).-с.49-54.
2. Карташов Г.Д. Методы форсированных испытаний// В помощь слушателям семинара по надежности и прогрессивным методам контроля качества промышленных изделий.-М.,1979.-с.56-98.
3. Nikitin V., Lapko A. Metody oceny okresu przydatnosci uzytkowej elementow i wykonczenia wnetrz w budowlach zabytkowych, Materiały II Konf. Naukowo-Technicznej "Budownictwo Sakralne'98", Białystok, 7-8 maja 1998.
4. Зеликин С.И., Землянский В.Н., Цивилев Р.П. Исследование кинетики разрушения материалов рентгенографическим методом// Стекло и керамика, 1979.-№6.-с.23-24.
5. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: Справочное издание/Под ред. В.В. Налимова.-М.:Металлургия,1982.-752с.
6. Дэниэл К. Применение статистики в промышленном эксперименте/Пер. с англ.-М.:Мир,1979.-300с.
7. Никитина О.И., Никитин В.И., Кузьмин И.Д. Влияние состава формовочной смеси и режимов тепловой обработки на структуру и долговечность стеновой керамики// Строительные материалы,1979.-№4.-с.12-13.
8. Кузьмин И.Д., Селюк Г.П., Никитина О.И., Никитин В.И. Оценка морозостойкости стеновой керамики// Строительные материалы,1980.-;4.-с.22-23.

УДК 624.071.3

**Шимановский А.О., Куземкина Г.М.**

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН ДЕФОРМАЦИЙ В РАМНОЙ КОНСТРУКЦИИ ОДНОЭТАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЗДАНИЯ

В производственных зданиях нередко устанавливается оборудование, работающее в режиме ударного нагружения. При ударах в строительных конструкциях начинается распространение волн деформаций и напряжений. Такие же явления наблюдаются при сейсмических нагрузках. В результате отражений от узлов каркаса здания и наложения нескольких

волн в отдельных его местах могут возникать напряжения, превышающие допускаемые. Поэтому необходимо иметь информацию о характере распространения волн в строительных конструкциях.

Для динамического расчета сложных конструкций в настоящее время используются, как правило, численные ме-

**Шимановский Александр Олегович**, к.т.н., доцент каф. «Техническая физика и теоретическая механика» Белорусского государственного университета транспорта.

**Куземкина Галина Михайловна**, ст. преподаватель каф. «Техническая физика и теоретическая механика» Белорусского государственного университета транспорта.

Беларусь, 246032, г. Гомель, ул. Юбилейная 2-21.

Строительство и архитектура