

Тадеуш Бобко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОД ВЛИЯНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Введение

В исследованиях последних десятилетий научно обоснованы, достаточно широко и с пользой для решения производственных и научных задач представлены способы определения количества тепла экзотермии различных видов цементов отечественного и зарубежного производства, выдвигаются справедливые гипотезы о прямолинейности зависимости между прочностью бетона и количеством тепла гидратации цемента. Однако, *практически нет математических моделей, однозначно определяющих взаимосвязи прочности бетона и экзотермии цемента, их обусловленность и ограничения, выступающие в производственных условиях при пониженных температурах зимы умеренного климата* представлены между другими в [1-4].

Исследования проводились на цементе производства стран СНГ и польских фирм (Хелм, Гураждже, Новины, Малогощ), в соответствии с существующими методами, представленными в технической и нормативной литературе.

Главной целью являлось *построение адекватных математических моделей взаимосвязи прочности бетона и количества экзотермического тепла, высвобождающегося в результате реакции гидратации цемента.*

Исследования закономерностей тепловыделения цемента в процессе гидратации проводились непрерывно и фиксировались по истечении 6, 12, 24, 48, 72, 120, 168 часов с момента затворения при температуре $5 \div 60^\circ\text{C}$, а также в процессе твердения бетона. Модели такого типа необходимы при проектировании энергосберегающих технологий возведения бетонных и железобетонных конструкций в зимних условиях.

Закономерности изменения тепла гидратации во времени и цементов и прочности бетона в зависимости от температуры и времени твердения

Данные тепла гидратации рассматриваемых видов цемента стран СНГ, полученные при изотермически-адиабатических условиях твердения, представлены таблицами 1, 4 и рисунками 1-7, а данные цементов производства польских фирм, представлены работами [4], и исследованиями автора [1], выполненными на различных марках по истечении 120 часов от начала твердения бетона в адиабатических условиях (см. табл. 2-7 и рис. 1-4).

ТАБЛИЦА 1

Величина экзотермического тепла гидратации цемента $H = f(\tau, t_0)$, кДж/кг

Вид цемента	Температура твердения °С	Продолжительность процесса твердения, ч						
		6	12	24	48	72	120	168
Глиноземистый 50*	20	65	119	206	311	364	405	416
	5	24.7	32.8	49.3	102.7	143.7	174.5	205.3
Быстро-твердеющий 60	10	32.8	49.3	73.9	123.2	164.2	228.5	266.9
	20	61.6	102.7	143.7	205.3	287.4	308.1	328.5
	40	114.9	184.8	228.5	287.4	328.5	349.1	369.6
	60	205.3	246.4	287.4	328.5	369.6	396.4	410.6
Портландский 50	5	12.3	24.7	41.1	87.0	123.2	164.2	184.8
	10	24.7	41.1	61.6	102.7	164.2	225.9	246.4
	20	41.1	82.1	123.2	184.8	246.6	266.9	287.4
	40	102.7	164.2	205.3	266.9	287.4	318.3	349.1
	60	184.8	225.9	266.9	308.1	349.1	360.3	369.6
Портландский 40	5	–	12.8	28.7	61.6	106.7	139.7	184.6
	10	12.3	24.7	49.3	102.7	143.7	185.5	205.3
	20	41.1	65.6	102.7	164.2	205.3	256.8	266.9
	40	82.0	131.2	184.6	225.9	266.9	298.9	308.1
	60	127.2	184.6	225.9	266.9	308.1	319.4	328.5
Портландский 30	5	–	12.3	24.5	56.8	81.3	122.1	162.6
	10	8.1	24.1	42.9	81.3	122.6	158.3	183.9
	20	23.9	44.1	79.2	124.9	158.8	202.8	235.1
	40	49.1	81.3	143.0	183.9	229.9	239.6	245.2
	60	81.5	143.0	183.9	229.9	265.6	275.9	286.1
Шлакопортландский 30	5	–	12.2	24.6	40.8	61.3	110.4	122.6
	10	–	24.6	32.7	61.3	102.2	143.1	163.4
	20	–	32.7	61.3	122.6	143.1	170.2	204.3
	40	40.8	73.5	114.4	163.4	204.3	237.6	245.1
	60	61.3	102.2	143.1	204.3	224.7	247.4	265.6

* - по данным Е.В. Шнипко

Данные исследований являются необходимым статистическим материалом - основой для построения предпочтительных математических моделей, отражающих технологические междуфакторные взаимосвязи, выступающие в сочетании экзотермия-прочность в условиях строительного производства. Во внимание брались также результаты исследований среднеэкзотермичных цементов, описанных в [1] и представленных в таблице 7, для которых автор разработал адекватные математические модели динамики изменения теплоты гидратации.

Исследования закономерностей изменения прочности бетона во времени и температуре в зависимости от вида цемента, производимого в странах СНГ и Польше представлено результатами, помещенными в таблицах 4 и 5, позволяют построить предпочтительные математические модели рассматриваемых взаимосвязей в целях определения прочности бетона и, что не есть маловажным, - это построение корреляционных моделей, определяющих зависимость изменения количества экзотермического тепла гидратации цемента от прочности бетона и изменения прочности бетона от величины тепла гидратации цемента.

При помощи многовариантного аппроксимирования результатов экспериментальных данных установлены тип, параметры, коэффициенты регрессии и определители пригодности построенных предпочтительных математических моделей, описывающих взаимосвязи изменения прочности бетона, тепла гидратации цемента во времени и температуре. Результаты представлены в виде таблиц 6-8 и рисунков 5-7. Адекватность моделей подтверждается результатами лабораторных и натуральных исследований. Организационно-технологические взаимосвязи этого типа представлены автором в настоящей диссертации 350-ю предпочтительными математическими моделями, построенными и исследованными в производственных и лабораторных условиях.

Корреляционные модели, определяющие зависимость изменения количества экзотермического тепла гидратации цемента от прочности бетона и изменения прочности бетона от величины тепла гидратации цемента аппроксимированы, сведены в таблицах и служат прикладным математическим аппаратом анализа прогнозирования прочности бетона в динамике множества предикторных производственных факторов процесса возведения бетонных и железобетонных конструкций.

Предпочтительные математические модели, описывающие группу взаимосвязей $R_u = F(H)$ и $H = F(R_u)$, построенные на основе аппроксимирующих функций, и адекватные производственным условиям набора прочности бетона при $t_6 \leq 5^\circ\text{C}$:

- для бетона В40 на БТЦ60

$$H = 22.86 + 6.09R_u \quad (1)$$

$$R_u = 1.187 + 0.071H + 0.0002H^2 \quad (2)$$

при средней кривизне $K_{rs} = 0.000368$, оцениваемой определением *малая* скорости изменения $0.086 \leq \frac{\partial R_u}{\partial H} \leq 0,141$ МПа/(кДж/кг)

среднем ускорении $\frac{\partial^2 R_u}{\partial H^2} = 0.000376$ МПа/(кДж/кг)²

функционале $L_3(y) = 0.054$;

– для бетона В30 на ПЦ50

$$H = -10.1 + 12.19R_u - 0.137R_u^2 \quad (3)$$

при средней кривизне $K_{rs} = 0.000515$, оцениваемой как *малая*, скорости изменения $6.368 \leq \frac{\partial H}{\partial R_u} \leq 11.006$ (кДж/кг)/МПа

среднем ускорении $\frac{\partial^2 H}{\partial R_u^2} = -0.02739$ (кДж/кг)/МПа²

функционале $L_3(y) = -4.628$

– для бетона В20 на ПЦ40

$$R_u = 0.64 + 0.6H \quad (4)$$

$$H = \frac{R_u}{0.0851 - 0.0014R_u} \quad (5)$$

при средней кривизне $K_{rs} = 0.000175$, оцениваемой как *малая* скорости изменения $12.069 \leq \frac{\partial H}{\partial R_u} \leq 18.838$ (кДж/кг)/МПа

среднем ускорении $\frac{\partial^2 H}{\partial R_u^2} = -0.02739$ (кДж/кг)/МПа²

функционале $L_3(y) = 0.253$;

– для бетона В15 на ПЦ30

$$R_u = -0.19 + 0.05H \quad (6)$$

$$H = 7.769 + 16.19R_u + 0.6969R_u^2 \quad (7)$$

при средней кривизне $K_{rs} = 0.000175$, оцениваемой как *малая* скорости изменения $16.467 \leq \frac{\partial H}{\partial R_u} \leq 26.322$ (кДж/кг)/МПа

среднем ускорении $\frac{\partial^2 H}{\partial R_u^2} = 1.394$ (кДж/кг)/МПа²

функционале $L_3(y) = 9.854$;
 – для бетона В15 на ШПЦ30

$$R_u = -0.39 + 2.128 H \tag{8}$$

$$H = 23.69 + 49.55(\lg R) + 133.03(\lg R_u)^2 \tag{9}$$

при средней кривизне $K_{rs} = 0.000612$, оцениваемой как *малая*

скорости изменения $-56.64 \leq \frac{\partial H}{\partial R_u} \leq 20.148$ (кДж/кг)/МПа

среднем ускорении $436.66 \geq \frac{\partial^2 H}{\partial R_u^2} \geq -2.02 =$ (кДж/кг)/МПа²

функционале $L_3(y) = 76.79$.

ТАБЛИЦА 2

Изменение теплоты гидратации высокоэкзотермичных цементов во времени

t час	Теплота гидратации цемента, кДж/кг							
	БТЦ60	при 30°C	ПЦ45 Хелм (20°C)		ПЦ35 Хелм (20°C)		ПЦ35 Гуражджэ (20°C)	
24	187,4	198,705	241	239,07	263	264,59	255	253,77
48	250,4	265,28	289	289,05	312	312,83	296	296,6
72	315,2	298,64	310	309,17	330	330,15	314	313,3
120	328,5	332,04	328	325,2	336	340,42	325	325,44
168	349,1	348,75	331	330,01	340	340,18	328	328,04

3, 5, 7, 9 - столбцы с аппроксимированными данными

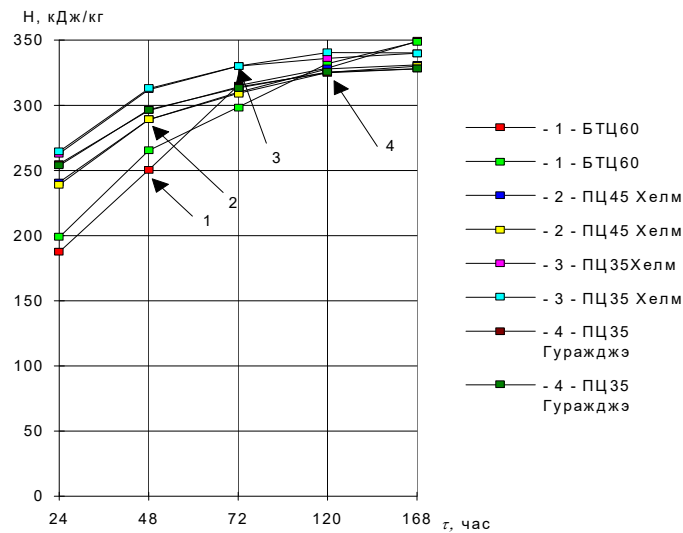


Рис. 1. Изменение во времени теплоты гидратации высокоэксотермичных цемента

ТАБЛИЦА 3

**Изменение теплоты гидратации высоко- и среднеэксотермичных цемента
во времени**

t час	Теплота гидратации цемента, кДж/кг							
	ПЦ35z Стш. Ополь		ПЦ35z Хелм		ПЦ50		ПЦ40	
6	32	32,3			41,1	48,62	41,1	46,14
12	127,1	127,14	88,2	88,22	82,1	85,43	65,6	64,76
24	220	220,2	174	173,66	123,2	137,49	102,7	99,57
48	273	273,64	244,2	244,17	184,8	197,73	164,2	159,47
72	294	292,36	273	272,42	246,4	231,54	205,3	206,42
120	302	302,8	294	294,27	266,9	268,24	256,8	261,48
168	304	301,66	301	300,31	287,4	287,8	266,9	264,75

3, 5, 7, 9 - столбцы с аппроксимированными данными

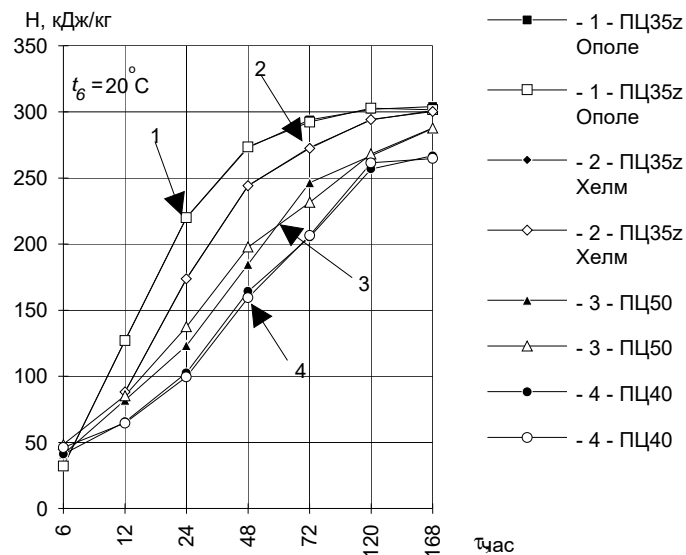


Рис. 2. Изменение во времени теплоты гидратации высоко- и среднеэксотермичных цемента

ТАБЛИЦА 4

Изменение теплоты гидратации среднеэксотермичных цемента во времени

t час	Теплота гидратации цемента, кДж/кг							
	ПЦ35р Гуражджэ		ПЦ45 Малокощ		ПЦ35 Новины		ПЦ35р Новины	
24	191	192,71	164	165,99	186	186,7	153	153,29
48	257	256,65	235	236,09	236	236,22	219	219,42
72	278	280,97	261	263,12	256	258,15	246	246,92
120	295	297,86	279	282,54	276	278,39	270	269,84

168	297	300,61	284	286,4	284	287,22	277	277,79
3, 5, 7, 9 - столбцы с аппроксимированными данными								

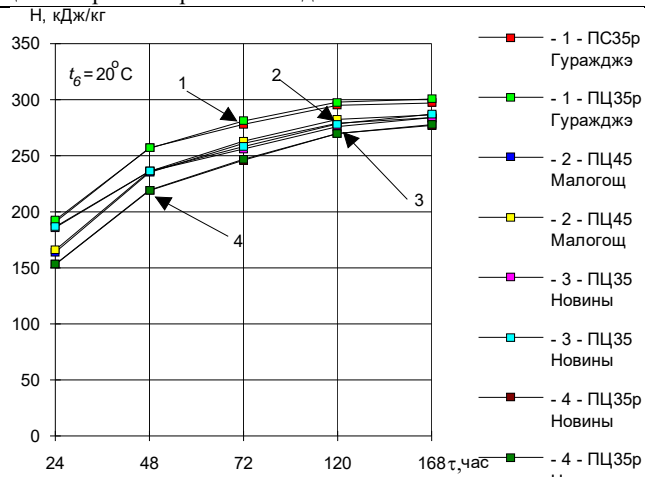


Рис. 3. Изменение во времени теплоты гидратации среднеэкзотермичных цементов

ТАБЛИЦА 5

Теплота гидратации глинозёмистого и слабоэкзотермичного цемента во времени

t час.	Теплота гидратации цемента, кДж/кг						
	Глинозёмистый 50*	ПЦ35/90 Малокоц		ПЦ30		ШПЦ30	
6	65			23,9	22,99		
12	119	37	37,16	44,1	45,61	32,7	29,62
24	206	98	97,74	79,2	79,63	61,3	70,14
48	311	149	149,07	124,9	125,05	122,6	113,94
72	364	174	174,81	158,8	156,91	143,1	141,08
120	405	205	202,73	202,8	202,6	170,2	176,87
168	416	218	218,38	235,1	236,08	204,3	201,42

3, 5, 7, 9 - столбцы с аппроксимированными данными

* - по данным Шнипко

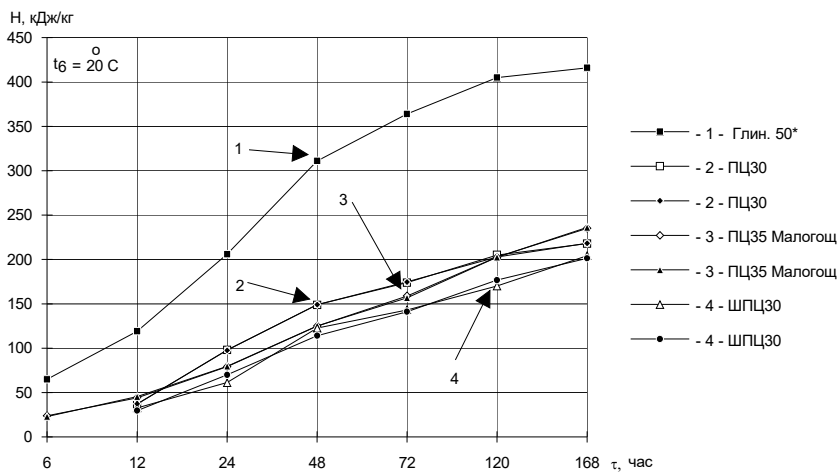


Рис. 4. Изменение теплоты гидратации глинозёмистого и слабоэкзотермичного цемента во времени

ТАБЛИЦА 6

Изменение теплоты гидратации цемента во времени

t час	Теплота гидратации цемента, кДж/кг							
	БТЦ60		ПЦ50		ПЦ40		ПЦ30	
6	32,8	34,7	24,7	21,68	12,3	10,85	8,1	9,88
12	49,3	44,86	41,1	36,6	24,7	25,42	24,1	21,66
24	73,9	75,28	61,6	64,95	49,3	52,85	42,9	43,99
48	123,2	125,96	102,7	115,66	102,7	100,85	81,3	83,66
72	164,2	164,99	164,2	158,38	143,7	139,71	122,6	116,7
120	228,5	224,03	225,9	219,88	185,5	190,03	158,3	162,86
168	266,9	268,92	246,4	249,44	205,3	203,8	183,9	182,45

3, 5, 7, 9 - столбцы с аппроксимированными данными

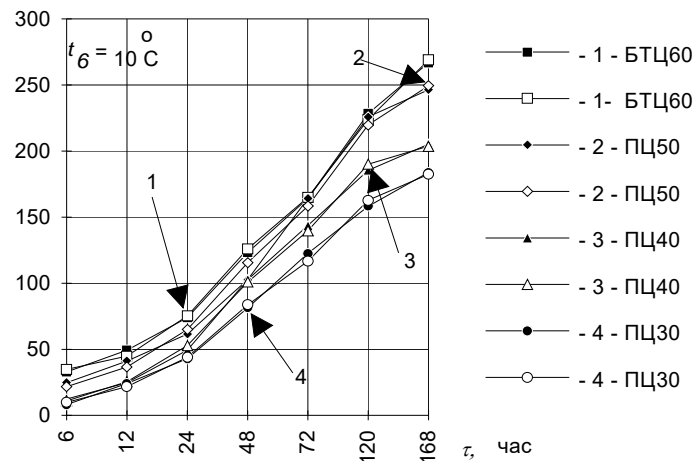


Рис. 5. Изменение во времени теплоты гидратации цемента

ТАБЛИЦА 7

Изменение теплоты гидратации цемента во времени

t час	Теплота гидратации цемента, кДж/кг							
	БТЦ60		ПЦ50		ПЦ40		ПЦ30	
6	24,7	21,61	12,3	11,04				
12	32,8	36,83	24,7	23,14	12,3	11,64	12,3	12,78
24	61,6	64,42	41,1	46,02	28,7	29,42	24,5	24,07
48	102,7	104,4	87	86,54	61,6	66,61	56,8	54,89
72	143,7	133,52	123,2	120,08	106,7	97,36	81,3	81,97
120	174,5	176,25	164,2	166,17	139,7	145,55	122,1	125,59

168	205,3	208,06	184,8	184,31	184,6	183,05	162,6	160,12
3, 5, 7, 9 - столбцы с аппроксимированными данными								

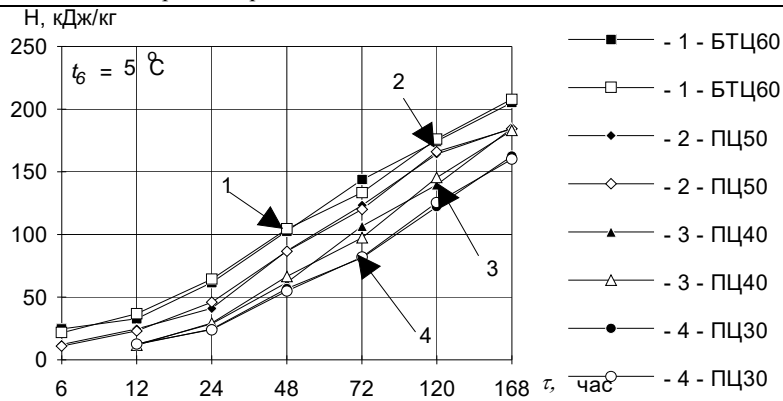


Рис. 6. Изменение во времени теплоты гидратации цемента

ТАБЛИЦА 8

Изменение теплоты гидратации цемента во времени

t час.	Теплота гидратации цемента, кДж/кг			
	ШПЦ30 при 10 гр.С		ШПЦ30 при 5 гр.С	
12	24,6	18,55	12,2	12,86
24	32,7	36,61	24,6	24,91
48	61,3	69,33	40,8	46,87
72	102,2	97,52	61,3	66,36
120	143,1	140,31	110,4	99,47
168	163,4	164,98	122,6	126,52

3, 5 - столбцы с аппроксимированными данными

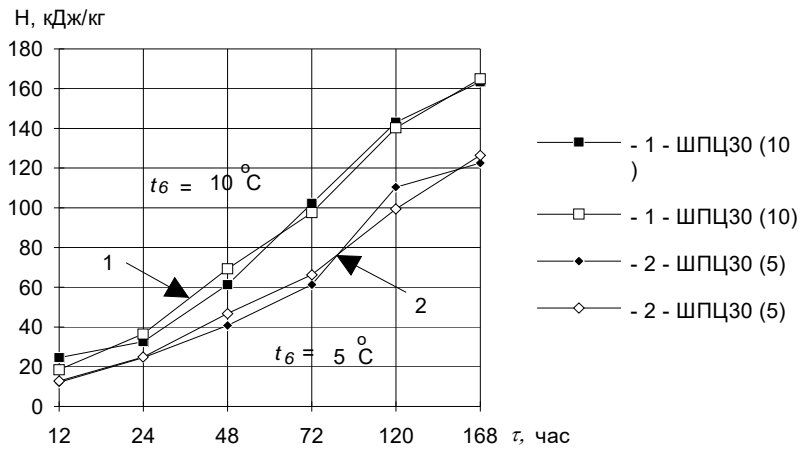


Рис. 7. Изменение во времени теплоты гидратации цемента

Выводы

1. Построены *предпочтительные математические модели*, описывающие группу взаимосвязей $R_u = F(H)$.
2. Анализ экспериментальных исследований изменения тепла гидратации цемента при изменяющейся во времени температуре показывает близкую сходимость с исследованиями [1-4] и позволяет сделать выводы о том, что:
 - исследуемые виды цемента производства стран СНГ и представленных польских фирм к 168 - часам выдерживания выделяют одинаковое количество экзотермического тепла гидратации цемента (см. рис. 1-7);
 - исследуемые виды цемента производства фирм Хелм, Гураждже, Новины, Малоощ (см. табл. 5), сравнимые по активности с цементом стран СНГ (см. табл. 1), в первые шесть суток гидратации показывают относительно большую величину тепловыделения, о чём свидетельствуют данные таблиц 2-5 и рисунки 1-7. Причиной этому является то, что:
 - исследуемые виды цемента производства польских фирм сдержат $5.4 \leq C_3A \leq 14.6\%$ (табл. 5),
 - исследуемые виды цемента производства фирм стран СНГ (табл. 1) сдержат $C_3A \leq 6\%$.
3. Анализ взаимосвязей $R_u = F(H)$ и $H = F(R_u)$ ставит под сомнение справедливость гипотезы о прямолинейной зависимости между количеством тепла экзотермии цемента и прочностью бетона обосновывает необходимость дальнейших исследований.

Литература

- [1] Bobko T.F., Optymalizacja potencjału energetycznego tężenia mieszanki w aspekcie zapewnienia wymaganej mrozoodporności betonu i elementów konstrukcyjnych. Wyniki badań, Podstawy modelowania i prognozowania, Monografia 47, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1997.
- [2] Kiernożycki W., Termiczne naprężenia wymuszone w betonowych budowlach masywnych z uwzględnieniem zjawisk reologicznych, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej 1992 nr 487, Instytut Inżynierii Jądowej nr 31.
- [3] Курбатова И.И., Химия гидратации портландцемента, Стройиздат, М.: 1977.
- [4] Рамачандран В., Фельдман Р., Бодуен Дж., Наука о бетоне, Стройиздат, М.: 1975.

Резюме

В настоящей статье рассматривается метод моделирования взаимосвязи между основными факторами, влияющими на набор прочности бетона при пониженных и отрицательных температурах наружного воздуха.

Streszczenie

W niniejszym opracowaniu omówiono metodę i algorytm modelowania współzależności pomiędzy głównymi czynnikami procesu uzyskania przez beton wytrzymałości na ściskanie, zapewniającej odporność mrozową w temperaturach obniżonych i zimowych za pomocą ciepła uwodnienia cementu.