

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

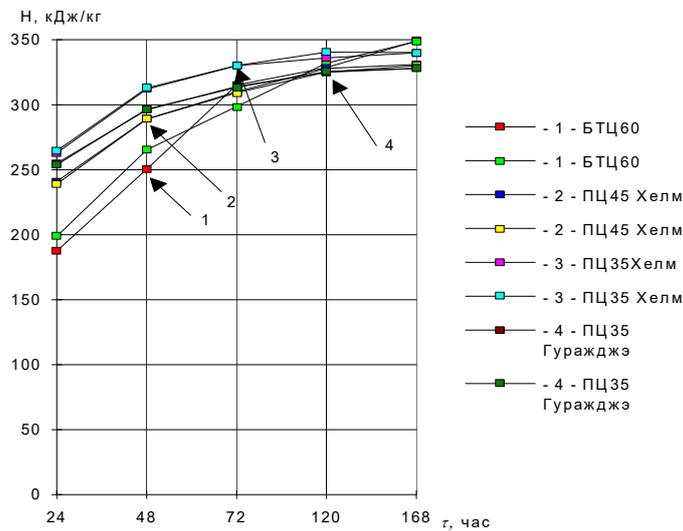


Рис. 1. Изменение во времени теплоты гидратации высокоэксотермичных цемента

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

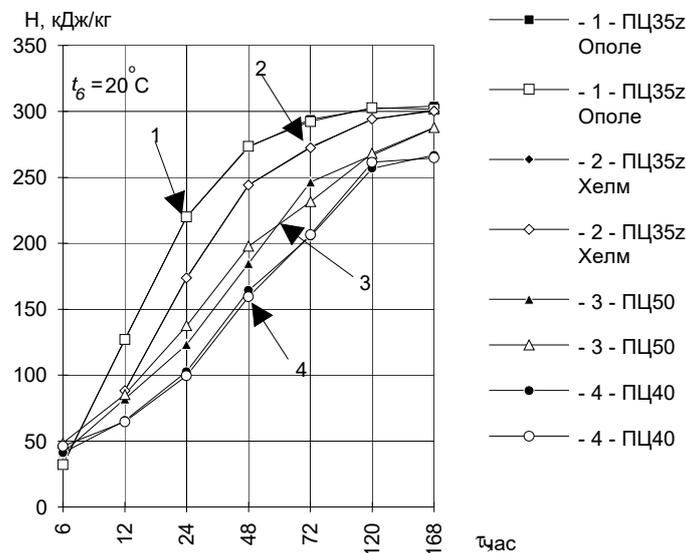


Рис. 2. Изменение во времени теплоты гидратации высоко- и среднеэксотермичных цемента

ТАБЛИЦА 4

Изменение теплоты гидратации среднеэксотермичных цемента во времени

| t час | Теплота гидратации цемента, кДж/кг | | | | | | | |
|----------|------------------------------------|--------|--------------|--------|-------------|--------|--------------|--------|
| | ПЦ35р Гуражджэ | | ПЦ45 Малогищ | | 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 | | | | | | | | |

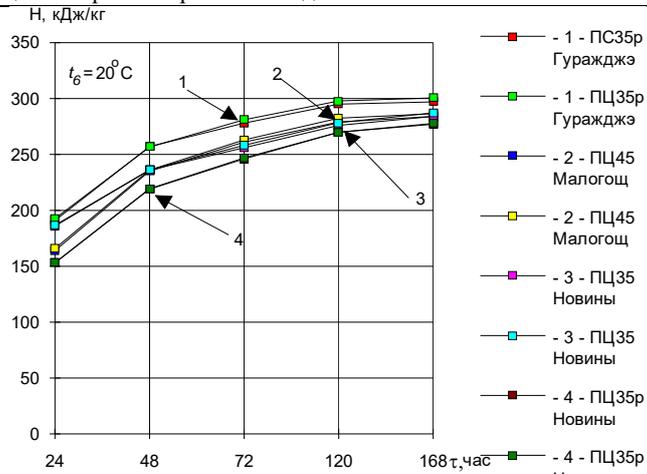


Рис. 3. Изменение во времени теплоты гидратации среднеэкзотермичных цементов

ТАБЛИЦА 5

Теплота гидратации глинозёмистого и слабоэкзотермичного цемента во времени

| t час. | Теплота гидратации цемента, кДж/кг | | | | | | |
|--------|------------------------------------|----------------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | Глинозёмистый 50* | ПЦ35/90 Малоощ | | 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

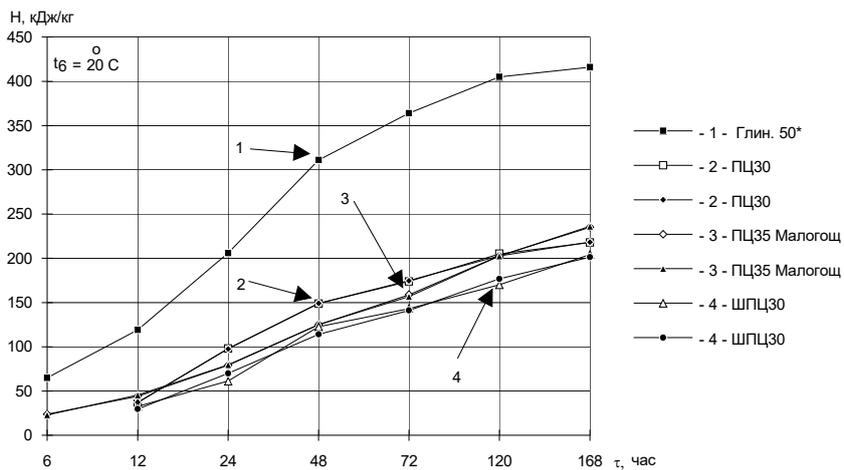


Рис. 4. Изменение теплоты гидратации глинозёмистого и слабоэкзотермичного цемента во времени

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

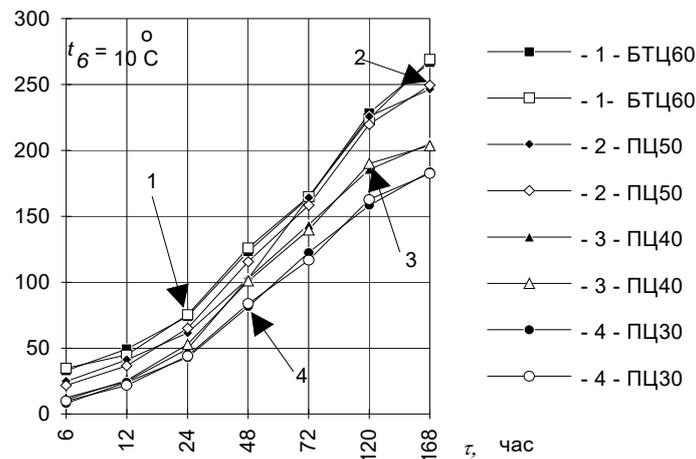


Рис. 5. Изменение во времени теплоты гидратации цемента

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 | | | | | | | | |

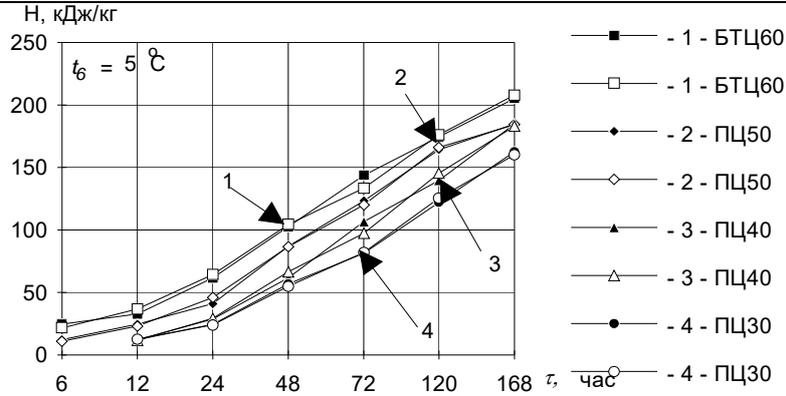


Рис. 6. Изменение во времени теплоты гидратации цемента

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

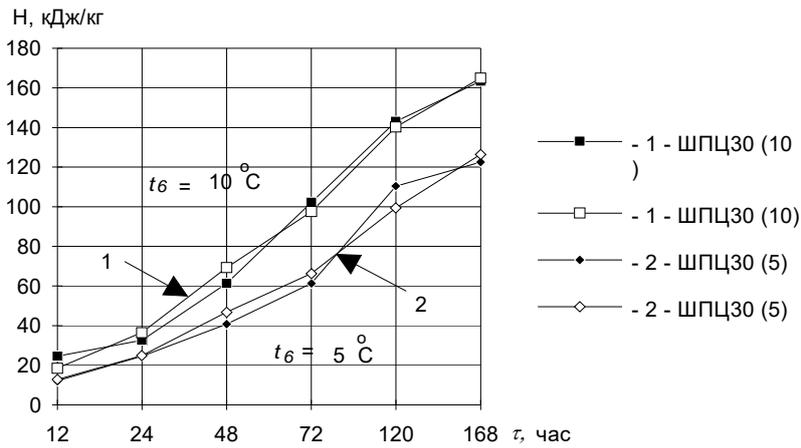


Рис. 7. Изменение во времени теплоты гидратации цемента

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) содержат $C_3A \leq 6\%$.
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.