

УДК 69.059

Секретная В.Н.,

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ УСТРОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОННЫХ ПОЛОВ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*Предложен метод прогнозирования динамики твердения высокопрочных бетонных полов. Приведена взаимосвязь между нарастанием пластической прочности бетона и технологическими операциями затирки.*

**Ключевые слова:** бетонный пол, технология затирки, схватывание бетона, пластическая прочность, окно отделки.

**Актуальность темы.** На сегодняшний день в Украине особо актуальной стала проблема повышения качества и срока службы современных высокопрочных бетонных полов. Одним из наиболее важных этапов технологического процесса их устройства является механическая затирка бетонной поверхности. Характерной особенностью затирочных операций является то, что они проводятся на ранней стадии твердения бетонной смеси. Процесс твердения интенсивно изучается многие годы и для устройства ровных и прочных полов промышленных и гражданских зданий, где объемы работ достигают десятков тысяч квадратных метров, это имеет большое значение. В первую очередь, для организационно-технологических решений затирочных работ представляет интерес прогнозирование динамики твердения бетонной смеси.

**Цель и задачи исследования.** Прогнозирование с помощью математического моделирования на основе экспериментально полученных данных динамики твердения бетонной смеси для оптимизации организационно-технологических решений затирочных работ.

**Материал исследования.** Проведение затирочных работ до начала схватывания бетонной смеси практически невозможно. При проведении затирочных работ в отложенном режиме часто не хватает времени на их выполнение до момента окончания схватывания бетонной смеси. Затирка после окончания схватывания бетонной смеси приводит к пылению и отслаиванию поверхности, снижению ее прочностных характеристик, а сама поверхность становится непригодна к отделке.

Влияние различных факторов (температура окружающей среды, влажность, ветер, температура бетона и основания, и др.) не позволяет визуально определить точное время начала затирочных работ. Принято, что

бетон можно затирать после исчезновения водяного блеска на поверхности, когда он выдерживает стоящего человека, а след от его обуви имеет глубину не более 6 мм [8]. Такой подход, очевидно, не может служить основанием для принятия решений по началу производства затирочных работ. Учитывая, что вес человека, размер обуви, свойства ее подошвы, поверхность опоры и другие подобные параметры могут варьироваться и не описаны в нормативной литературе, определение момента начала работ является вероятностным процессом.

Более эффективным может быть метод определения начала и окончания затирочных работ, который демонстрирует научное обоснование принимаемых организационно-технологических решений. О важности данного вопроса говорит то, что в международных требованиях к устройству бетонных полов введено понятие «окно затирки», которое определяется как промежуток времени между началом и концом схватывания бетонной смеси [7].

Кривая гидратации портландцемента (рис. 1) имеет S-образную форму, которую можно условно разбить на пять участков, имеющих характеристики продолжительности [4, 5, 6].

Рис.1 - Развитие процессов гидратации в бетоне

При устройстве высокопрочных бетонных полов, в первую очередь, актуален период III (рис. 1), когда цементное тесто схватывается и приобретает начальную прочность [3].

Сегодня единой математической модели, описывающей кинетическую кривую гидратации портландцемента, не существует. Однако, некоторые участки стандартной кривой гидратации могут быть аппроксимированы отдельными математическими моделями.

Стандартной методикой предусматривается измерение сроков схватывания цементного теста нормальной густоты прибором Вика [1]. Здесь значения времени начала и конца схватывания, также как и значение нормальной густоты цементного теста, выбраны условно, поэтому периоды времени характеризуют лишь промежуточные этапы процесса твердения, а не какие-либо параметры изменений, происходящих в цементном тесте. Данный метод не позволяет оценивать пластическую прочность бетона, не связан с динамикой процесса.

В стандарте [2] предусмотрена взаимосвязь с динамикой процесса гидратации (рис. 2). При пластической прочности 3,4 МПа происходит начальное схватывание бетона. С этого момента бетон уже нельзя подвергать уплотнению вибраторами, поскольку вибрации будут приводить к необратимым повреждениям формирующейся структуры. При пластической прочности в 27,6 МПа бетон достигает прочности на сжатие около 0,6 МПа и может выдерживать некоторые незначительные нагрузки. Этот момент времени является предельным для окончания процесса затирки [7].

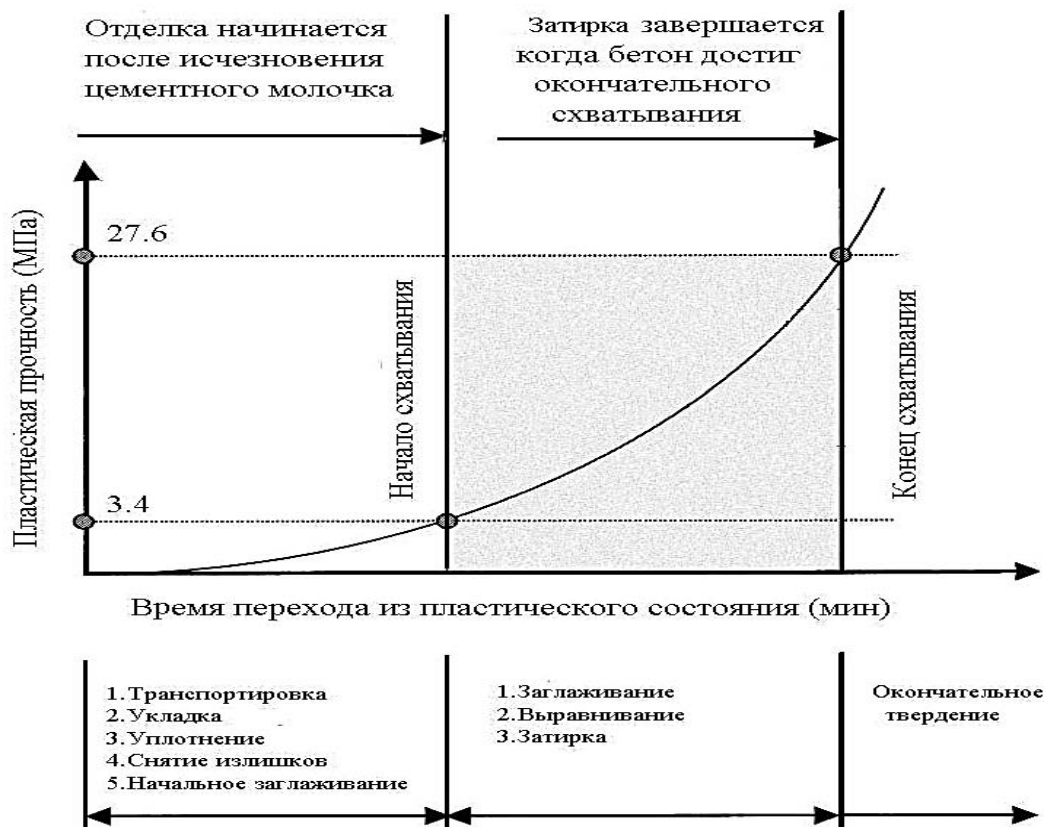


Рис. 2 - Этапы устройства бетонного пола в зависимости от времени и значений пластической прочности

Не прекращаются попытки теоретическим путём определить параметры начала и конца схватывания бетонной смеси. Этому вопросу посвящены работы и предложены модели расчёта параметров твердеющего бетона [3, 9]. В

частности, в работе [3] предложена методика определения начала и конца схватывания, основанная на исследовании конкретных бетонных смесей, их степени гидратации с помощью адиабатического калориметра. В работе приведена конечная формула для определения времени схватывания бетона, при этом использовалось дорогостоящее и редко встречающееся оборудование.

На основе упомянутого метода нами была сделана попытка упростить выполнение задачи получения данных о начале и конце схватывания бетонной смеси. Для этих целей был собран стенд, который может быть использован как в лабораторных условиях, так и в условиях промышленного строительства (рис. 3).

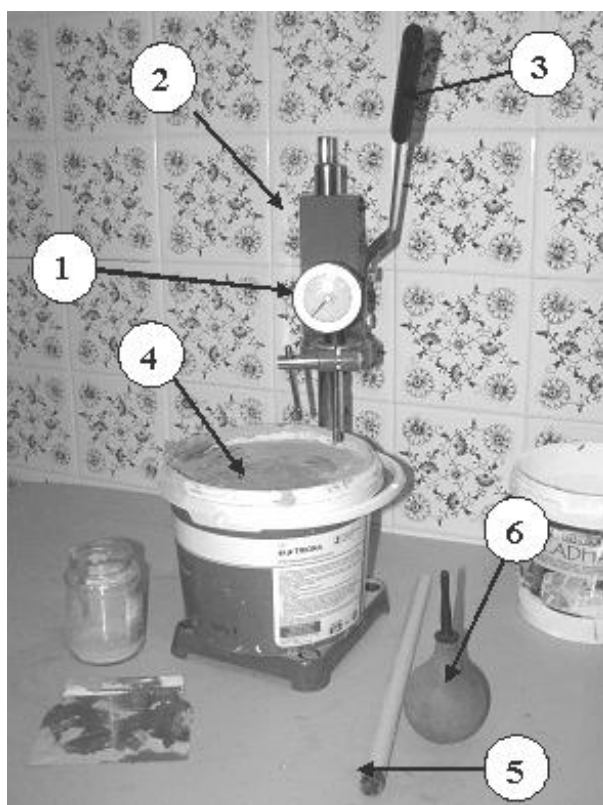


Рис. 3 - Лабораторный стенд для измерения пластической прочности бетонной смеси: 1 – пенетрометр модели Н-4132 фирмы Humbolt; 2 – перемещаемая каретка; 3 – ручка для перемещения каретки с пенетрометром; 4 – испытуемый состав; 5 – штыковка; 6 – пипетка для сбора цементного молочка с поверхности бетона.

На данном стенде в лабораторных условиях были проведены экспериментальные исследования смеси, где в качестве вяжущего использован портландцемент СЕМ 1 42,5 N ОАО «Балцем». Суть эксперимента заключалась в том, что игла пенетromетра с периодичностью 15 мин. вдавливалась в просеянный бетон. Полученные данные в кгс делились на площадь поверхности иглы пенетromетра ( $0,316 \text{ см}^2$ ) и приводились к единице измерения МПа.

Результаты измерений (табл. 1) до точки начала пластической прочности в 3.4 МПа, определяющей начало затирочных работ, явились исходным материалом для математического моделирования процесса нарастания пластической прочности бетонной смеси. Графическая интерпретация пластической прочности  $P$  от времени  $t$  приведена на рис. 4 (аппроксимация по программному комплексу MathCAD 14).

Таблица 1 – Результаты измерений

№ пп.	Пластическая прочность $P$ , МПа	Время набора пластической прочности $t$ , мин	$\log(P)$ , МПа	$\log(t)$
1	0.5	200	-0.301	2.301
2	0.7	215	-0.155	2.332
3	1.2	230	0.079	2.362
4	1.8	245	0.255	2.389
5	2.4	260	0.38	2.415
6	3.3	275	0.519	2.439
7	14.4	350	1.158	2.544
8	18.3	365	1.262	2.562
9	25.1	380	1.4	2.58
10	28.2	395	1.45	2.597

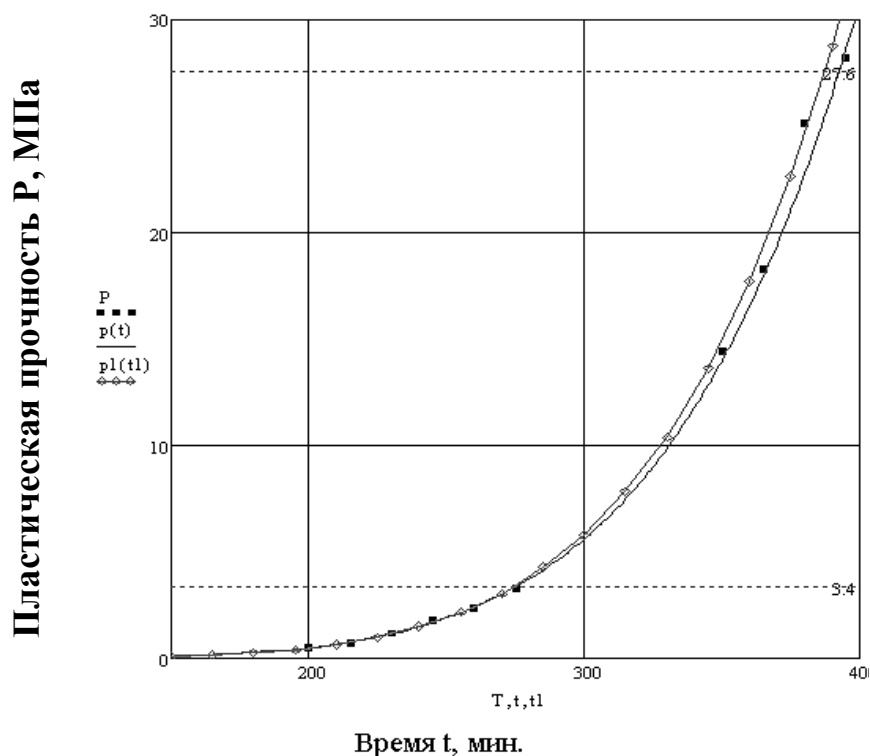


Рис. 4 - Нарастание пластической прочности бетона во времени  
 $P$  – 10 экспериментальных точек;  $p(t)$  – аппроксимация 10 экспериментально полученных точек;  $p1(t1)$  – график, построенный по 6 начальным точкам экстраполированный до 27,6 МПа.

Степень гидратации определяет прочность цементного камня, а характер набора прочности бетоном на ранней стадии твердения (в данном случае, период III, рис. 1) описывается уравнением вида [2, 4]:

$$p = a \times t^b \tag{1}$$

где:  $p$  – величина пластической прочности, МПа;  
 $t$  – время после начала затворения, мин;  
 $a$  и  $b$  – константы регрессии.

Из приведенного уравнения можно получить начальное и конечное время схватывания бетона. Для определения значений констант регрессии  $a$  и  $b$  производится линеаризация указанной функции путём логарифмирования левой и правой ее частей:

$$\log p = \log a + b \times \log t \tag{2}$$

Принимается, что:  $A = \log a$ ;  $T = \log t$ ;  $P = \log p$ ;

$$P = A + b \times T$$

Константы регрессии определяем с помощью программного комплекса MathCAD 14 (рис. 5), вводя данные из табл.1. Затем производим прогнозирование нарастания пластической прочности бетона по шести начальным точкам (рис. 6).

Из графиков рис. 4 видно, что совпадение прогнозируемого графика и графика, аппроксимированного по экспериментальным точкам достаточно близкое.

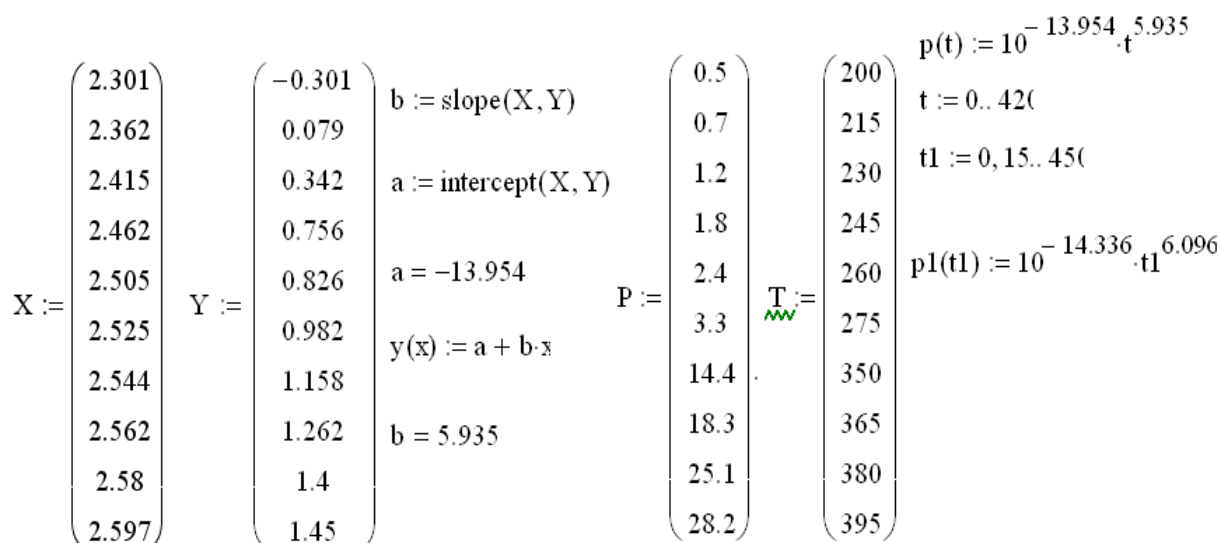


Рис. 5 - Вычисления для построения графика аппроксимации по 10 экспериментальным точкам

$$\begin{array}{l}
 X := \begin{pmatrix} 2.301 \\ 2.332 \\ 2.362 \\ 2.389 \\ 2.415 \\ 2.439 \end{pmatrix} \\
 Y := \begin{pmatrix} -0.301 \\ -0.155 \\ 0.079 \\ 0.255 \\ 0.38 \\ 0.519 \end{pmatrix}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 a := \text{intercept}(X, Y) \quad b := \text{slope}(X, Y) \\
 y(x) := a + b \cdot x \quad x := 0, 0.1.. 10 \\
 a = -14.336 \quad b = 6.096
 \end{array}$$

Рис. 6 - Прогнозирование нарастания пластической прочности по 6 начальным точкам

Для получения значений времени нарастания пластической прочности необходимо прологарифмировать уравнение (1) и из него определить параметр времени  $t$ :

$$\log P = a + b \log t \quad \text{или} \quad \log t = \frac{\log p - a}{b} \quad (3)$$

Подставляя полученные значения коэффициентов регрессии, а также значения пластической прочности начала и конца схватывания [2] в уравнение (3), можно получить начальное и конечное время схватывания. Итак, началом схватывания бетона считается время, при котором бетон приобретает пластическую прочность 3,4 МПа, а концом схватывания – при котором пластическая прочность составляет 27,6 МПа. Подставляя эти значения в уравнение (3), получаем, что разница между прогнозным графиком  $p_1(t_1)$  (рис. 4) и графиком, построенным по всем экспериментальным точкам  $p(t)$ , составляет 3 мин., что является допустимым в условиях строительства. Полученное значение «окна затирки» составляет 1 час 51 мин. и для проведения качественных затирочных операций необходимы организационно-технологические решения, обеспечивающие продолжительность работ не более полученной.

**Выводы.** Процесс нарастания пластической прочности бетонной смеси неразрывно связан с технологическими операциями по затирке поверхности высокопрочных полов. Использование описанного метода дает возможность спрогнозировать «окно затирки» бетонной поверхности и как следствие:

- рассчитать оптимальные размеры захваток;
- правильно подобрать количественный и квалификационный состав бригады, количество и тип затирочных машин;
- выполнить затирочные операции до окончания схватывания бетонной смеси;

– получить качественное и прочное покрытие, соответствующее заданным показателям ровности.

### Список использованной литературы

1. Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема: ГОСТ 310.3-76. – Офиц. изд. – М.: Стройиздат, 1978. – 17 с. – (Межгосударственный стандарт).
2. Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance: ASTM C 403 – М. – USA: American Society for Testing and Materials. Pennsylvania, 1999. – 20 р.
3. Anton K. Shindler. Prediction of concrete setting / Anton K. Shindler. – USA: Department of civil engineering. Auburn University. Alabama, 2005. – 14 р.
4. Невилль А.М. Свойства бетона / А. М. Невилль; пер. с англ. В.Д. Парфенова, Т.Ю. Якуб. – М.: Издательство литературы по строительству, 1972. – 345 с.
5. Брыков А.С. Гидратация портландцемента: [учебное пособие] / А. С. Брыков. – С-Пб.: Центр бетонных технологий, 2008. – 30 с.
6. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
7. Guide to curing concrete: ACI 308R-01. – USA: American concrete institute, 2001. – 31 р.
8. Guide for concrete floor and slab construction: ACI 302.1 R-04. – USA: American concrete institute, 2004. – 77 р.
9. Бабицкий В.В. Прогнозирование характеристик твердеющего тяжелого бетона [сборник научных трудов] / Бабицкий В.В., Семенюк С.Д., Бирик М.С. – Республика Беларусь. БНТУ, 2010. – 12 с.

### Анотація

Запропоновано метод прогнозування динаміки твердіння бетонної суміші до моменту схоплювання. Наведено взаємозв'язок між наростанням пластичної міцності бетону і технологічними операціями щодо затірки бетонних підлог.

**Ключові слова:** бетонна підлога, технологія затірки, схоплювання бетону, пластична міцність, вікно обробки.

### Annotation

A method of predicting of concrete hardening up to final setting was proposed. The connection between plastic strength gain of the concrete and trowelling operations to concrete slabs was shown.

**Key words:** concrete slab, technology of trowelling, final setting of concrete, plastic strength, window of finishability.