

Михаил Сергеевич БИБИК,  
кандидат технических наук, директор  
ОАО "Завод ЖБИ № 1"

Вячеслав Вацлавович БАБИЦКИЙ,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры  
"Технология бетона  
и строительные материалы"  
Белорусского национального  
технического университета

## ОБ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕЖИМАХ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

### ABOUT ENERGY-SAVING CONDITIONS OF HEAT CURING OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE PRODUCTS

Проанализированы элементы методики назначения и расчета энергосберегающих режимов тепловой обработки бетона. Описан программный продукт для проектирования режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий в агрегатах периодического действия.

Some elements of the technique of specification and design of energy-saving conditions of heat curing of concrete have been analyzed. The software product is described for designing conditions of heat curing of concrete and reinforced concrete products in batch-type units.

#### ВВЕДЕНИЕ

На стадии тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий формируются основные свойства бетона (структура, прочность, морозостойкость, водонепроницаемость и т. п.), определяющие в конечном итоге долговечность материала. Чтобы ускорить процессы структурообразования бетона, его необходимо нагреть до определенной температуры, обеспечивающей получение заданных свойств материала в требуемый промежуток времени. Следовательно, необходимо затратить энергию, что делает стадию тепловлажностной обработки одним из самых энергоемких переделов в процессе производства сборного железобетона. В связи с этим внимание технологов [1–3], и особенно в последнее время [4], направлено на распространение и совершенствование энергосберегающих режимов тепловой обработки. Классический энергосберегающий режим предполагает нагрев бетона изделия до определенной температуры за относительно короткий период времени. А дальнейшее твердение бетона осуществляется как за счет накопленной в тепловом агрегате теплоты, так и теплоты, поступающей при экзотермических реакциях цемента в процессе его гидратации. Такие режимы менее энергоемки, чем классические трапецеидальные, но более длительны. Поэтому рядовому инженеру-технологу необходимо решать извечную трудноразрешимую проблему, чтобы были "и овцы целы, и волки сыты", то есть получить в заданные сроки требуемую прочность бетона, причем с минимально возможными энергетическими затратами. Отсюда следует, что режим тепловой обработки надо не назначать, а рассчитывать, желательно с учетом всего многообразия влияющих факторов.

#### НАЗНАЧЕНИЕ РЕЖИМОВ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА

Для назначения таких энергосберегающих режимов тепловой обработки инженеры-технологи Республики

Беларусь в недавнем прошлом пользовались рекомендациями, приведенными в [5]. Согласно этим рекомендациям рассчитывают так называемый показатель длительности остывания камеры  $A$ , ч, который интегрально характеризует способность теплового агрегата, например, пропарочной камеры, удерживать накопленную теплоту:

$$A = \frac{c_b \cdot \rho_b \cdot V_b + c_m \cdot \rho_m \cdot V_m + c_{ок} \cdot \rho_{ок} \cdot V_{ок}}{3,6 \cdot (K_1 \cdot F_1 + K_2 \cdot F_2 + K_3 \cdot F_3 + K_4 \cdot F_4)}, \quad (1)$$

где  $c_b, \rho_b, V_b; c_m, \rho_m, V_m; c_{ок}, \rho_{ок}, V_{ок}$  — удельная теплоемкость, плотность и объем соответственно для бетона изделий, металла, ограждающих конструкций;

$K_1, F_1; K_2, F_2; K_3, F_3; K_4, F_4$  — коэффициент теплопередачи и площадь поверхности соответственно для наружных стен выше нулевой отметки пола, наружных стен ниже нулевой отметки пола, днища, крышек.

Величины коэффициентов теплопередачи берут из соответствующих таблиц [5] с учетом конструктивных особенностей теплового агрегата. Затем в зависимости от класса бетона по прочности на сжатие, заданной прочности бетона, группы активности цемента при пропаривании (технологические факторы), показателя длительности остывания блока камер (камеры)  $A$  (теплотехнические факторы) и оборачиваемости камер в сутки (организационный фактор) назначают температуру разогрева бетона. Для удобства данные формируют в табличной форме, как, например, в таблице 1.

Уже беглый взгляд на описанную систему расчетов показывает ограниченность модели, поскольку, например, технологические факторы представлены только прочностью бетона, а его состав практически игнорируется. Не учитываются внешние условия эксплуатации теплового агрегата и пр.

В Республике Беларусь указанный документ [5] подвергся достаточно серьезному совершенствованию [6].

Таблица 1. Назначение параметров режима тепловой обработки бетона

Класс бетона по прочности на сжатие	Заданная прочность, % от проектной	Температура разогрева бетона, °С, при значениях показателя А		
		10–40	41–80	81–150
1 группа цемента при оборачиваемости камер в сутки $n = 1,0$				
В15	50	60	55	50
	60	75	70	65
	70	—	—	80
...	...	...	...	...
3 группа цемента при оборачиваемости камер в сутки $n = 1,5$				
В37,7	50	70	65	60
	60	85	80	75

Схема расчета температуры разогрева бетона (как по структуре, так и по фактическому наполнению) полностью сохранилась. Однако включение в нее упрощенного расчета теплового баланса (рис. 1) позволило существенно повысить точность конечных результатов. А расчет коэффициента полезного использования тепловой энергии позволяет оценить эффективность различных вариантов тепловой изоляции камер. В то же время такая схема назначения термосных режимов тепловой обработки бетона имеет ряд недостатков, отмеченных в [7]. В частности, достаточно сложным является учет влияния химических добавок на особенности режима. Решению этого вопроса посвящены работы коллектива авторов, возглавляемого профессором Э. И. Батяновским [4, 8], а также одного из соавторов данной статьи [9]. Однако справедливости ради надо отметить, что результатом этих (и иных исследований) явились опять-таки общие рекомендации по назначению, а не расчету режимов тепловой обработки.

### ПОПЫТКА РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА

В результате широкого использования методов математического планирования эксперимента (для сокращения объема проводимых опытов), было исследо-

вано влияние комплексных химических добавок (суперпластификатор С-3 + разнообразные ускорители твердения) на процессы твердения бетона [9]. При этом изучались не только кинетика изменения физико-механических характеристик бетона, но и тепловыделение цемента. Это послужило основой для реализации одним из соавторов настоящей статьи [9] (под руководством профессора И. Н. Ахвердова) попытки разработки методики примерного расчета энергосберегающих термосных режимов тепловой обработки бетона в следующей последовательности.

1. Выбирают исходные характеристики:

- тепловой агрегат для реализации термосного режима тепловой обработки бетона: габариты, материалы, металлоемкость;
- особенности бетона изделий: класс бетона по прочности на сжатие, вид и количество химических добавок, расход цемента, масса арматуры, группа активности цемента при пропаривании;
- количество загружаемых в тепловой агрегат форм, объем бетона, масса металла;
- назначение величины отпускной прочности бетона, оборачиваемости камеры, начальной температуры камеры, скорости подъема температуры, длительности предварительной выдержки.

2. Рассчитывают показатель длительности остывания камеры А по исходным характеристикам: конструкция и габариты теплового агрегата, объем бетона, масса форм.

3. Назначают по таблице из документа [5] температуру разогрева бетона, исходя из требуемой прочности бетона после тепловой обработки, класса бетона по прочности на сжатие, оборачиваемости камеры, группы активности цемента при пропаривании и показателя длительности остывания камеры А.

4. Строят график изменения температуры на всех стадиях тепловой обработки: предварительной выдержки, подъема температуры, термосной выдержки, выгрузки камеры. Изменение температуры на стадии термосной выдержки (до снятия крышки камеры) рассчитывают в зависимости от показателя длительности остывания камеры А как линейную функцию от времени выдержки.



Рис. 1. Принцип расчета термосных режимов тепловлажностной обработки тяжелого бетона согласно ТКП 45-5.03-13 [6]

5. Весь цикл тепловой обработки разбивают на определенные периоды, и для каждого интервала рассчитывают приведенное время в соответствии с гипотезой, предложенной В. С. Лукьяновым [10], суть которой заключается в том, что время твердения при любой температуре можно с помощью переходных коэффициентов выразить через время твердения при нормальной температуре.

6. Суммируя приведенное время для каждого периода, находят общую величину приведенного времени за весь цикл тепловой обработки бетона.

7. Посредством ранее полученного графика в системе координат "приведенное время — удельное тепловыделение цемента" применительно к используемому цементу и химическим добавкам и с учетом расхода цемента находят тепловыделение бетона как для всех стадий тепловой обработки, так и общее.

8. По полученному значению тепловыделения цемента рассчитывают уточненное значение температуры бетона в конце периода термосного выдерживания.

9. С помощью графика в системе координат "приведенное время — относительная прочность бетона", предварительно построенного после обработки экспериментальных данных для данного вида цемента и химических добавок, определяют величину относительной прочности бетона, получаемую по окончании тепловой обработки бетона.

10. Если полученное значение относительной прочности бетона меньше заданного (согласно пункту 1), то температуру разогрева произвольно увеличивают в сравнении с величиной, определенной по пункту 3, а если больше — уменьшают.

11. Затем производят расчеты по приведенной выше схеме, начиная с пункта 4. Расчеты последовательно повторяют, пока величина рассчитанной относительной прочности бетона не будет примерно равной заданной.

Представленная схема расчета, при всех ее явных недостатках, имеет существенное достоинство — она позволяет не назначать, а рассчитывать предполагаемый режим тепловой обработки.

**ПРЕДЛАГАЕМАЯ СХЕМА РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОНА**

Рассмотрим более подробно параметры термосного режима тепловлажностной обработки бетона (рис. 2а) на примере камеры без теплоизоляции (показатель длительности остывания камеры А1) и с теплоизоляцией (А2). Время предварительной выдержки  $t_{пв}$ , подъема температуры  $t_{пт}$  и термосной выдержки  $t_{тв}$  одинаково для обоих случаев. Температура среды в камере на стадии подъема температуры также идентична. Однако в связи со сравнительно большими тепловыми потерями через ограждающие конструкции камеры в первом случае (А1) удельный расход теплоносителя (например, пара) будет существенно больше, чем во втором (А2). Потери теплоты, а, следовательно, расход теплоносителя на этой стадии определяются не только в зависимости от теплотехнических характеристик камеры, но и от внешних параметров, например, температуры окружающего воздуха, скорости ветра, что, к сожалению, не учитывается как в [5], так и в [6]. Затем подача теплоносителя прекращается и начинается стадия термосной выдержки.

Естественно, скорость остывания в камере без теплоизоляции выше, чем с теплоизоляцией. Соответственно во втором случае складывается более благоприятная ситуация для твердения бетона, и конечная прочность бетона больше. Для компенсации недобора прочности в первом случае (А1) температура разогрева должна быть увеличена (рис. 2б). Прочность бетона на стадии разогрева несколько больше, чем для второго случая (А2).

В последующем темп твердения для А1 падает, но к концу тепловой обработки для обоих вариантов прочность бетона достигает заданного значения. Естественно, эффект достигнут посредством большего расхода тепловых ресурсов. Для компенсации недостатков камеры без теплоизоляции может быть увеличена проектная прочность бетона (изменением расхода цемента, введением химических добавок и иными технологическими приемами) и, соответственно, относительная и абсолютная — после тепловой обработки. Кроме того, может быть назначена более длительная термосная выдержка изделий.

В соответствии с изложенным предлагается следующая схема расчетов энергосберегающих режимов тепловлажностной обработки бетона (рис. 3), разработанная для математического описания процессов, графически представленных на рис. 2. По мере ее реализации производится анализ вариантов и выбирается тот, который характеризуется меньшим потреблением энергосредителя. Для облегчения и повышения точности расчетов разработан программный продукт, основные окна которого представлены на рис. 4. Данный продукт представляет собой ответвление описанного ранее программного обеспечения [11, 12], ориентированного на проектирование полновесных (со стадией изотермической

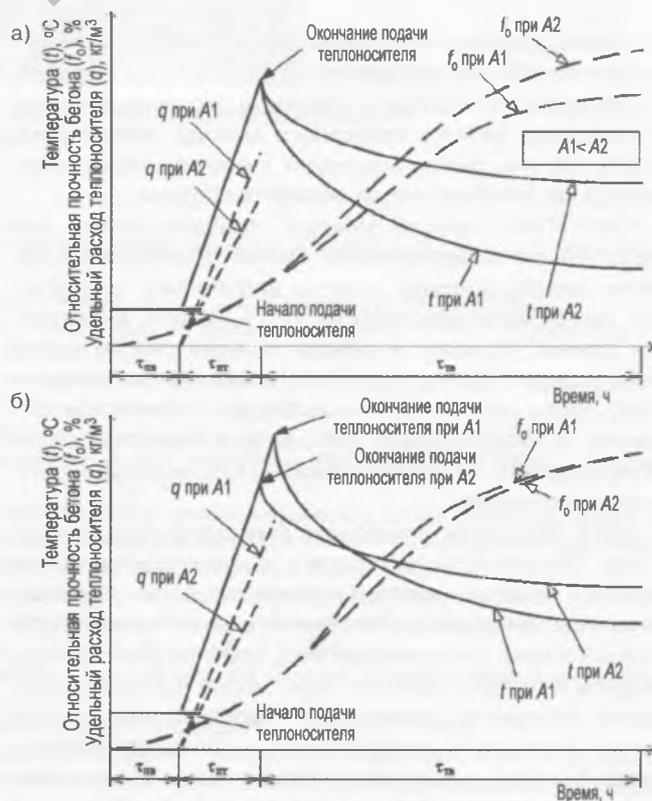


Рис. 2. Графическое представление различных вариантов термосного режима тепловлажностной обработки: а — разогрев до одной температуры бетона; б — разогрев до разной температуры бетона



Рис. 3. Схема расчета энергосберегающих режимов тепловлажностной обработки бетона, положенная в основу программного продукта

выдержки) режимов тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий.

Рассмотрим последовательность расчетов. Вначале посредством любого известного метода проектируют состав бетона. Затем переходят к расчету термосного режима тепловлажностной обработки бетона.

Окно "Конструкция камеры" предназначено для ввода общих характеристик ямной пропарочной камеры: длина, ширина, высота над полом, заглубление, масса металлических частей в камере, конструкция стенок, крышки и днища камеры (число слоев тепловой изоляции, толщина и материал каждого слоя). Виды теплоизоляции выбирают из имеющегося списка, а необходимые для расчета характеристики (коэффициент теплопроводности, плотность) вводятся автоматически.

Ввод исходных влияющих факторов продолжают в окне "Общие характеристики": объем изделия, объем бетона в изделии, масса и количество форм в камере, начальная температура бетонной смеси, температура воздуха в цехе (или на полигоне), коэффициент потери теплоты и степень сухости пара, марка и вид цемента, группа активности цемента при пропаривании, состав бетона (включая и комплексные химические добавки: пластификатор + ускоритель твердения), оборачиваемость камеры и стоимость 1 Гкал пара.

Далее переходят к окну "Расчет режима твердения", где инженер-технолог получает необходимую для дальнейшего анализа информацию: тепловой баланс

камеры, удельные расходы теплоты и пара, время предварительной выдержки, подъема температуры и термосного выдерживания, а также температура разогрева бетона. Кроме того, рассчитываются коэффициент полезного действия камеры и показатель длительности ее остывания А. Для сравнения различных вариантов тепловой обработки выдается и ее удельная стоимость.

В настоящее время описанная компьютерная программа проходит апробацию на ОАО "Завод ЖБИ № 1" (г. Минск) при расчетах термосных режимов тепловой обработки железобетонных изделий в ямных пропарочных камерах как в цехах, так и в полигонных условиях.

## ВЫВОДЫ

- 1 Предложена схема многофакторного проектирования энергосберегающих режимов тепловой обработки бетона, комплексно учитывающая теплофизические свойства теплового агрегата и характеристики бетона.
- 2 Разработана компьютерная программа для расчета основных параметров тепловой обработки бетона по термосным режимам, включая и стоимость. Программа проходит апробацию при расчетах энергосберегающих режимов тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий в ямных пропарочных камерах ОАО "Завод ЖБИ № 1" (г. Минск).

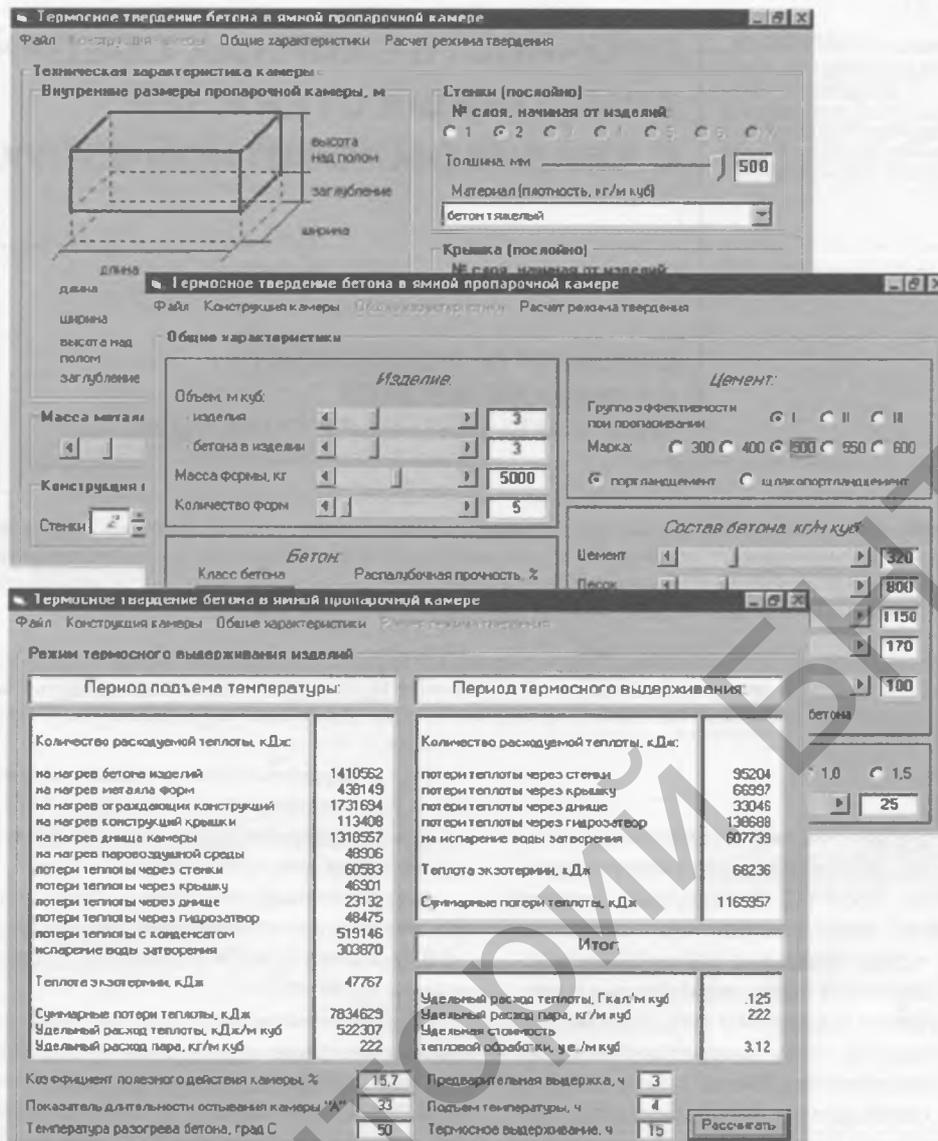


Рис. 4. Окна компьютерной программы для расчета энергосберегающих режимов тепловлажностной обработки бетона

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов, С. А. Рост прочности бетона при пропаривании и последующем твердении / С. А. Миронов [и др.]. — М.: Стройиздат, 1973. — 96 с.
2. Малинина, Л. А. Тепловлажностная обработка тяжелого бетона / Л. А. Малинина. — М.: Стройиздат, 1977. — 160 с.
3. Совалов, И. Г. Повышение качества сборного железобетона / И. Г. Совалов, Я. М. Якобсон, Л. С. Розенбойм, Т. А. Лалакина. — М.: Стройиздат, 1973. — 231 с.
4. Батяновский, Э. И. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона / Э. И. Батяновский, Е. А. Иванова, Р. Ф. Осос // Строительная наука и техника. — 2006. — № 3. — С. 7–17.
5. Пособие по тепловой обработке сборных железобетонных конструкций и изделий. — М.: Стройиздат, 1989. — 50 с.
6. Изделия бетонные и железобетонные сборные. Правила тепловлажностной обработки: ТКП 45-5.03-13-2005. — Минск: Стройтехнорм, 2006. — 59 с.
7. Биби́к, М. С. Общие принципы проектирования энергосберегающих режимов тепловой обработки железобетонных изделий в ямных пропарочных камерах / М. С. Биби́к, В. В. Бабицкий // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: сб. науч. статей / ГрГУ им. Я. Купалы. — Гродно: ГрГУ, 2010. — С. 292–296.
8. Батяновский, Э. И. Теоретико-практические аспекты эффективности добавок-ускорителей твердения бетона / Э. И. Батяновский, Н. С. Гуриненко, И. А. Кортянович, Д. А. Михневич // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: сб. науч. статей / ГрГУ им. Я. Купалы. — Гродно, 2010. — С. 278–283.
9. Биби́к, М. С. Энергоресурсосберегающая технология производства железобетонных изделий и конструкций: дис ... канд. техн. наук: 05.23.05 / М. С. Биби́к. — Минск, 1990. — 260 с.
10. Руководство по зимнему бетонированию с применением метода термоса. — М.: Стройиздат, 1975. — 192 с.
11. Бабицкий, В. В. Элементы проектирования режима тепловлажностной обработки бетона / В. В. Бабицкий, Н. В. Суходоева // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: сб. трудов XV Международ. научн.-метод. семинара. — Новополоцк, 2008. — С. 139–143.
12. Биби́к, М. С. К возможности проектирования режима тепловой обработки бетона в ямных пропарочных камерах / М. С. Биби́к, Н. В. Суходоева, В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. — 2009. — № 2. — С. 58–63.

Статья поступила в редакцию 26.07.2010.