

Бибик М.С.,
канд. техн. наук, директор
ОАО «Завод СЖБ № 1»

Бабицкий В.В.,
д-р техн. наук, профессор
кафедры «Технология
бетона и строительные
материалы» БНТУ

О возможности расчета энергосберегающих режимов тепловлажностной обработки бетона

Введение

Назначение тепловлажностной обработки бетона в технологии бетонных и железобетонных изделий – получение в кратчайшие сроки продукции, отвечающей заданным требованиям. Но чтобы ускорить процессы твердения бетона, его необходимо разогреть до определенной температуры.

Весь классический режим тепловлажностной обработки бетона распадается на последовательные этапы: предварительная выдержка (без внешней подачи теплоты), подъем температуры (затраты энергии на разогрев как бетона изделий, так и конструкций теплового агрегата, а также на потери теплоты в окружающую среду), изотермическая выдержка (потери теплоты в окружающую среду), охлаждение (массированный выброс теплоты в окружающую среду). Перечисленные статьи расхода теплоты неизбежны для любых режимов твердения и тепловых агрегатов.

Тогда закономерен вопрос: как же экономить энергию?

Задача решается по нескольким направлениям. Совершенствуются сами тепловые агрегаты, обычно посредством эффективной внутренней тепловой изоляции, в результате чего сокращаются затраты на разогрев конструкций камеры и на потери во внешнюю среду, создаются условия для сокращения периода изотермической выдержки или его полного отказа. Корректируются составы бетонной смеси с целью повышения темпа твердения цемента, например снижением водоцементного отношения (обычно посредством введения пластифицирующих добавок) и применением добавок ускорителей процессов твердения бетона. Совершенствуются методики расчета режимов тепловлажностной обработки бетона

посредством учета всего комплекса влияющих факторов, в том числе и тепловыделения цемента при твердении бетона.

Какие же направления экономии энергии обрабатываются на ОАО «Завод СЖБ № 1»?

Совершенствование тепловых агрегатов

На ОАО «Завод СЖБ № 1» достаточно смело реализуются новые веяния в технологии бетона. Здесь осуществляется не только обработка энергосберегающих режимов тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий, но и другие направления: дробление на месте железобетонных конструкций с последующим использованием стальной арматуры и крупного заполнителя, помол растворной части бетона с использованием продукта в качестве минеральной добавки в бетонные смеси, производство пустотных мелкоштучных блоков из арболита при утилизации собственных отходов деревообработки и пр. При этом все направления реализуются комплексно.

В частности, мелкоштучные блоки кроме своего прямого предназначения были использованы для совершенствования существующих ямных пропарочных камер. Часть пропарочных камер на заводе реконструирована (рис. 1) посредством утепления наружных ограждающих конструкций, традиционно выполненных из тяжелого бетона. Это реализовывалось путем кладки пустотелых блоков из арболита на всю высоту камер. Перегородки изолировались с использованием пеностекла. Во избежание намочения полученного термоизоляционного слоя вследствие контакта с паром и водой и повышения ввиду этого коэффициента теплопроводности кладка зашивалась металлическими листами.

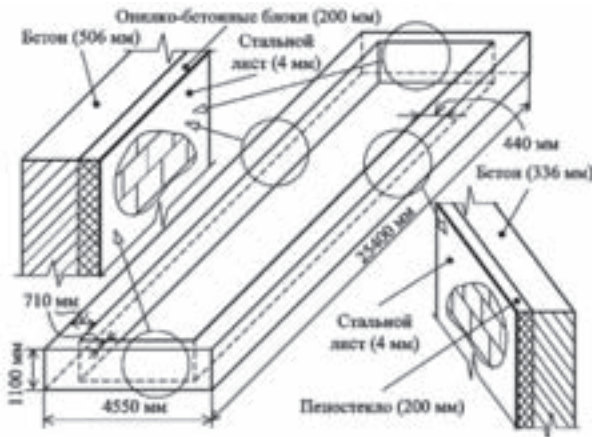


Рис. 1. Традиционные режимы тепловой обработки бетонных и железобетонных конструкций

Казалось бы, что может дать такая примитивная (на первый взгляд) термоизоляция в сравнении с широко рекламируемыми современными материалами? Как показали эксперименты, реконструированные камеры хорошо удерживают накопленную энергию и позволяют полностью отказаться от стадии изотермической выдержки изделий, т.е. полноценно реализовать энергосберегающие режимы тепловлажностной обработки бетона. Прикидочные расчеты свидетельствуют, что даже при такой теплоизоляции годовой экономический эффект от модернизации одной камеры может составить до \$1500 при стоимости 1 Гкал пара около \$25. И затраты на дополнительную тепловую изоляцию камеры окупаются уже за один-два года ее эксплуатации.

Назначение традиционного энергосберегающего режима тепловлажностной обработки бетона

Считается, что минимальная стоимость – у термосного режима тепловой обработки (рис. 2). Он предполагает разогрев бетона до определенной температуры, а затем отключение подачи теплоносителя. Стадия изотермической выдержки либо полностью отсутствует, либо минимальна.

Для реализации таких энергосберегающих режимов тепловой обработки инженеры-технологи пользуются рекомендациями, приведенными в [1], обобщенная схема расчета по которым представлена на рис. 3.

Включение в схему расчета упрощенного расчета теплового баланса позволило существенно повысить точность конечных результатов. А расчет коэффициента полезного использования тепловой энергии позволяет инженерам-технологам оценить эффективность различных вариантов тепловой изоляции камер. Показатель длительности остывания камеры «А», рассчитываемый по приведенной на рис. 3 формуле, характеризует в часах и фактически определяет тепловую инерционность пропарочной камеры. Он зависит от удельной теплоемкости ($c_b, c_m, c_{ок}$), плотности ($\rho_b, \rho_m, \rho_{ок}$) и объема ($V_b, V_m, V_{ок}$) бетона изделий, металла, ограждающих конструкций соответственно, а также от коэффициентов теплопередачи (K_1, K_2, K_3, K_4) и площади поверхности (F_1, F_2, F_3, F_4) наружных стен выше нулевой отметки пола, наружных стен ниже нулевой отметки пола, днища, крышек соответственно. Величины коэффициентов берутся из соответствующих таблиц в зависимости



Рис. 2. Энергосберегающий режим тепловлажностной обработки бетона



от конструктивных особенностей теплового агрегата.

Анализ представленной на рис. 3 модели расчета показывает ее некоторую ограниченность по следующим основным причинам:

- все факторы носят дискретный характер: классы бетона по прочности на сжатие С12/5, С16/20, С25/30 и С30/37; распалубочная прочность 50, 60 и 70%; показатель длительности остывания камеры «А» 10...40, 41...80 и 81...150 ч; оборачиваемость камер в сутки 1,0 и 1,5. Следовательно, возникает очевидная неопределенность при использовании других значений факторов. Яркий пример: как рассчитать (или назначить) режим тепловой обработки в выходные и праздничные дни?
- в числе факторов влияния отсутствует состав бетона (в первую очередь расход, вид и минералогический состав цемента, вид и количество химических добавок), из чего следует, что не учитываются темп твердения бетона и тепловыделения цемента, а это сказывается как на расходе теплоно-

сителя, так и длительности термосной выдержки;

- недостаточен учет теплофизических характеристик теплового агрегата, в котором осуществляется твердение изделий;
- нет связи режима тепловой обработки с внешними условиями. Пример – для идентичных тепловых агрегатов, расположенных в цехе и на полигоне (особенно зимой), режимы тепловой обработки должны быть различными;
- отсутствует основной критерий эффективности выбранного режима тепловой обработки – его стоимость. Именно минимальная цена затрат на тепловую обработку (естественно, при обеспечении всех требуемых характеристик твердеющего бетона) должна являться целью инженера-технолога.

Таким образом, следуя представленной на рис. 3 схеме, инженер-технолог фактически назначает (а не рассчитывает!) режим тепловой обработки бетона без учета всего многообразия влияющих факторов.



Рис. 3. Схема расчета термосных режимов тепловлажностной обработки тяжелого бетона по ТКП 45-5.03-13-2005

Расчет энергосберегающего режима тепловлажностной обработки бетона

Учитывая отмеченные недостатки анализируемой схемы (рис. 3), на наш взгляд представляется, что энергосберегающий режим тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий целесообразнее рассчитывать (проектировать), причем с обязательным условием его минимальной стоимости, для чего, естественно, необходимы соответствующие инструменты. К сожалению, разработанная ранее модель для полноценных классических режимов [2, 3] не позволяет автоматически рассчитывать и термосные режимы тепловой обработки. Для реализации последней задачи потребовалась существенная коррекция принципов расчета.

Проектирование энергосберегающих режимов тепловой обработки бетона предлагается по следующей схеме расчетов (рис. 4). Она базируется на том, что свойства бетона, формирующиеся в процессе твердения, определяются кинетикой изменения степени гидратации цемента, зависящей от свойств цемента,

та, состава бетонной смеси, температурно-влажностных условий и времени твердения, вида и дозировки химических добавок, особенностей технологии производства изделий.

Как оказалось, степень гидратации цемента на любой стадии твердения бетона можно с достаточной точностью рассчитывать, для чего разработана соответствующая математическая модель [4]. А это, в свою очередь, открывает возможность отслеживать кинетику тепловыделения цемента, изменение температуры в камере и бетоне на стадии термосной выдержки и, что весьма важно, физико-механические характеристики бетона [5]. Такая схема расчетов показала свою приемлемость при практической реализации модели применительно к монолитным конструкциям [6].

Естественно, возникла идея адаптировать уже отработанную математическую модель применительно к расчету (проектированию) энергосберегающих (критерий – минимальная стоимость) режимов тепловой обработки сборных бетонных и железобетонных конструкций.



Рис. 4. Схема проектирования энергосберегающих режимов тепловой обработки бетона



Для облегчения и повышения точности расчетов разработан программный продукт, основные окна которого представлены на рис. 5.

Рассмотрим последовательность расчетов. Вначале посредством любого известного метода проектируют состав бетона. Затем пе-

реходят к расчету термосного режима тепло-влажностной 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

Термосное твердение бетона в ямной пропарочной камере

Файл Конструкция камеры Общие характеристики Расчет режима твердения

Техническая характеристика камеры

Внутренние размеры пропарочной камеры, м

высота над полом
заглубление
длина
ширина

длина
ширина
высота над полом
заглубление

Стенки (послойно)

№ слоя, начиная от изделий: 1 2 3 4 5 6 7

Толщина, мм

Материал (плотность, кг/м куб)

Крышка (послойно)

№ слоя, начиная от изделий: 1 2 3 4 5 6 7

Толщина, мм

Материал (плотность, кг/м куб)

Термосное твердение бетона в ямной пропарочной камере

Файл Конструкция камеры Общие характеристики Расчет режима твердения

Общие характеристики

Изделия:

Объем, м куб:
- изделия
- бетона в изделиях
Масса форм, кг
Количество форм

Цемент:

Группа эффективности при использовании: I B III

Марка: 300 400 500 550 600

портландцемент шлакопортландцемент

Состав бетона, кг/м куб:

Цемент
Песок
Щебень
Вода

Бетон:

Класс бетона Распалубочная прочность, % 50 60 70

Термосное твердение бетона в ямной пропарочной камере

Файл Конструкция камеры Общие характеристики Расчет режима твердения

Режим термосного выдерживания изделий

Период подъема температуры:		Период термосного выдерживания:	
Количество расходуемой теплоты, кДж:		Количество расходуемой теплоты, кДж:	
на нагрев бетона изделий	1410562	потери теплоты через стенки	95204
на нагрев металла форм	438149	потери теплоты через крышку	66997
на нагрев ограждающих конструкций	1731694	потери теплоты через дно	33046
на нагрев конструктивной крышки	113408	потери теплоты через гидрозащит	138688
на нагрев дна камеры	1318557	на испарение воды затверения	607739
на нагрев пароизоляционной среды	48906	Теплота экзотермии, кДж:	68236
потери теплоты через стенки	60583	Суммарные потери теплоты, кДж:	1165957
потери теплоты через крышку	46901		
потери теплоты через дно	23132		
потери теплоты через гидрозащит	48475		
потери теплоты с конденсатом	519146		
испарение воды затверения	303870		
Теплота экзотермии, кДж:	4767		
Суммарные потери теплоты, кДж:	7834629		
Идеальный расход теплоты, кДж/м куб	522367		
Идеальный расход пара, кг/м куб	222		
		Итого:	
		Идеальный расход теплоты, Гкал/м куб	.125
		Идеальный расход пара, кг/м куб	222
		Идеальная стоимость тепловой обработки, у.е./м куб	3.12

Коэффициент полезного действия камеры, % Предварительная выдержка, ч

Показатель длительности остывания камеры "А" Подъем температуры, ч

Температура разогрева бетона, град С Термосное выдерживание, ч

Рис. 5. Окна компьютерной программы для расчета энергосберегающих режимов тепло-влажностной обработки тяжелого бетона

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 добавки – ускорители 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 компьютерная программа проходит апробацию на ОАО «Завод СЖБ № 1» Республики Беларусь при расчетах термосных режимов тепловой обработки железобетонных изделий в ямных пропарочных камерах как в цехах, так и в полигонных условиях.

Выводы

1. Реализована система совершенствования ямных пропарочных камер посредством внутренней тепловой изоляции мелкоштучными блоками из арболита, позволяющая за один-два года окупить затраты на их модернизацию.

2. Предложена схема многофакторного проектирования энергосберегающих режимов тепловой обработки бетона, основывающаяся на расчете степени гидратации цемента, определяющей, в свою очередь, кинетику тепловыделения цемента и конечные физико-механические характеристики бетона.

3. Разработана компьютерная программа для расчета основных параметров тепловлажностной обработки бетона по термосным режимам, включая и стоимость. Программа проходит апробацию при расчетах режимов твердения бетонных и железобетонных изделий в ямных пропарочных камерах.

Литература

1. ТКП 45–5.03–13–2005. Изделия бетонные и железобетонные сборные. Правила тепловлажностной обработки. – Мн.: Стройтехнорм, 2006. – 59 с.

2. 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 Междунар. научн.-метод. семинара. – Новополоцк, 2008. – С. 139–143.

3. Бибик, М.С. К возможности проектирования режима тепловой обработки бетона в ямных пропарочных камерах / М.С. Бибик, Н.В. Суходоева, В.В. Бабицкий // Строительная наука и техника. – 2009. – № 2. – С. 58–63.

4. Бабицкий, В.В. Прогнозирование степени гидратации цемента с химическими добавками / Бабицкий В.В. // Материалы, технологии, инструменты. – 2005. – № 1. – С. 76–79.

5. Суходоева, Н.В. Анализ формул для расчета прочности бетона на сжатие / Н.В. Суходоева, В.В. Бабицкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2009. – № 3. – С. 139–147.

6. Бабицкий, В.В. Прогнозирование характеристик твердеющего тяжелого бетона / В.В. Бабицкий, С.Д. Семенюк, М.С. Бибик // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. Випуск 18. – Рівне, 2009. – С. 3–12.

