

2. Лукомская, А. И. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий / А. И. Лукомская, П. Ф. Баденков, Л. М. Кепперша. – М., 1972.
3. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М., 1967.

4. Осипов, Ю. Р. Улучшение качественных показателей гуммировочных покрытий с помощью адаптивной системы оптимального управления процессом / Ю. Р. Осипов, С. Ю. Загребин, С. Ю. Осипов // Конструкции из композиционных материалов. – М., 2004. – Вып. 3. – С. 20–30.

УДК 666.97.035.55; 662.986.3; 662.614.2

К. В. Аксенчик, Н. И. Шестаков
Череповецкий государственный университет

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

В статье представлена методика расчета режимов тепловлажностной обработки железобетонных изделий, заключающаяся в определении в характерные моменты времени в характерных сечениях изделия температуры, влагосодержания и их перепадов между сечениями, а также в прогнозировании прочности бетона при сжатии и появления усадки материала. Приведены рекомендации по применению методики в инженерной практике. Выполнено сравнение разработанной и традиционной методик расчета режимов по расходу тепловой энергии, электроэнергии и затратам времени.

Тепловлажностная обработка, режим тепловлажностной обработки, бетон.

The article presented the calculation method of heat and moist treatment of ferroconcrete items. The method consisted in determination of temperature, moisture and their drops between the sections in typical times and sections of products and prediction of compressive strength of concrete and the appearance of concrete shrinkage. Guidance on the engineering application of the method is provided. Comparison of developed and traditional calculation methods of regimes at consumption of thermal energy, electricity and time-consuming is made.

Heat and moist treatment, regimes of heat and moist treatment, concrete.

Введение.

В настоящее время режимы тепловлажностной обработки (ТВО) назначаются по указаниям и рекомендациям с обязательной экспериментальной проверкой и уточнением параметров режимов или экспериментально-расчетными способами, которые характеризуются неэффективным использованием тепловой энергии в поверочных экспериментах, значительными расходами и трудозатратами на их проведение. Экспериментальная проверка проводится, как правило, на модельных образцах, отличающихся от железобетонных изделий кинетикой тепло- и массообменных процессов. На практике назначенные режимы часто не обеспечивают проектного энергопотребления и качества изделий, поэтому приходится проводить корректировку режимов в производственных условиях, увеличивать производственные площади для дозревания бетона, что ведет к повышению себестоимости продукции. Совершенствование тепловой работы пропарочных камер на основе расчетно-экспериментальных исследований процессов тепло- и массообмена является актуальной задачей.

Цель исследования – разработка усовершенствованной методики расчета режимов ТВО сплошных плоских бетонных и железобетонных изделий в пропарочной камере и рекомендаций по ее применению.

Основная часть.

Разработанная методика расчета режимов ТВО железобетонных изделий основана на определении в

характерные моменты времени ТВО в характерных сечениях изделия температуры, влагосодержания и их перепадов между сечениями, а также на прогнозировании прочности бетона при сжатии и появления усадки материала. Методика отличается от известных тем, что кроме влияния температуры учитывается еще и влияние влагосодержания.

Исходные данные для расчета.

1. Состав бетона, который может быть задан через удельные расходы компонентов ($\text{кг}/\text{м}^3$) – цемента ($Ц$), мелкого заполнителя ($П$), крупного заполнителя ($Ш$), воды ($В$), арматуры, или массовыми соотношениями $Ц:П:Ш$ и $В/Ц$; относительный объем вовлеченного или оставшегося в смеси воздуха; размеры изделия (толщина, длина, ширина).

2. Характеристики цемента: марка (активность), время начала схватывания, содержание активных минеральных добавок, группа эффективности при пропаривании.

3. Данные о теплофизических и массообменных свойствах бетона, включающие коэффициент теплопроводности сухого бетона при 0°C , коэффициент диффузии жидкой воды в бетоне, максимальное и равновесное влагосодержание.

4. Данные по тепло- и массообмену, включающие коэффициенты тепло- (α) и влаготдачи (α'), которые определяют по известным критериальным уравнениям.

5. Параметры режима ТВО: длительность каждого периода ТВО, начальная температура бетона и

окружающей среды, скорость подъема и снижения температуры среды в камере, относительная влажность среды в камере.

Методика включает следующие этапы:

- 1) расчет полей температуры и влагосодержания и их средних по сечению изделия значений;
- 2) прогнозирование прочностных характеристик бетона;
- 3) проверка условия непревышения перепадами максимальных значений;
- 4) прогнозирование потерь влаги бетоном после ТВО.

Расчет температуры, влагосодержания и их средних по сечению значений необходим для последующего определения их перепадов и проводится по инженерной методике, реализованной в программной среде Mathcad и максимально адаптированной для автоматизации инженерного труда в производственных условиях. На методику получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617851 от 05 августа 2014 г. [1].

Прогнозирование прочности бетона при сжатии перед подъемом температуры среды в камере и после ТВО необходимо для оценки качественных показателей бетона. Прочностные характеристики бетона определяют по любой известной методике или экспериментально. Условие набора бетоном требуемой прочности после ТВО выполняется в случае, когда относительная прочность бетона $R(\tau) / R_{28}$ ($R(\tau)$, R_{28} – прочность бетона при сжатии в возрасте τ и 28 сут, соответственно) в каждой точке сечения изделия будет не менее принятой.

Проверка условия не превышения перепадами максимальных значений заключается в следующем:

- 1) скорость нагрева бетона на поверхности изделия (в период подогрева) не должна превышать $20^\circ\text{C}/\text{ч}$, а для изделий толщиной 40 см и более – $10\text{--}15^\circ\text{C}/\text{ч}$ [6];
- 2) начальная прочность бетона при сжатии, достигаемая в период предварительной выдержки, должна соответствовать принятой скорости подъема температуры среды в камере согласно [6] (табл. 1);

Таблица 1

Соответствие скорости подъема температуры среды в камере и начальной прочности бетона

Скорость подъема температуры среды в камере, $^\circ\text{C}/\text{ч}$	Начальная прочность бетона, МПа
10–15	0,1–0,2
15–25	0,2–0,4
25–35	0,4–0,5
35–45	0,5–0,6
45–60	более 0,6

- 3) перепад температуры между поверхностью изделия и окружающей средой при выгрузке изделия из камеры не должен превышать 40°C [6];
- 4) температура в любой точке сечения изделия не должна превышать 100°C , иначе влага в бетоне мо-

жет закипеть, что приведет к нарушениям структуры материала.

Прогноз потерь влаги бетоном после ТВО необходим для предупреждения развития усадки в бетоне и проводится следующим образом: вычисляется влагосодержание на открытой поверхности бетона в конце ТВО по инженерной методике [1], далее это значение сравнивается с критическим $U_{кр}$, которое определяют по формуле, предложенной С. В. Александровским [5]:

$$U_{кр} = W + kU_{кр}^*,$$

где W – расчетное равновесное влагосодержание бетона в конструкции, соответствующее относительной влажности воздуха 70 %; $U_{кр}^*$ – расчетное избыточное сверх равновесной влажности W критическое влагосодержание бетона; k – коэффициент.

Если влагосодержание меньше или равно равновесному, то прогнозируется появление усадки бетона, и следует предусмотреть мероприятия по защите открытой поверхности изделий от испарения влаги после ТВО и распалубки, например, укрытие изделия пленкой, хранение изделий в камерах с нормальными температурно-влажностными условиями, увлажнение открытых поверхностей. Если влагосодержание меньше и равно критическому, то началась усадка бетона. Такой режим является небезопасным для изделия, и следует изменить параметры режима таким образом, чтобы исключить усадку.

Блок-схема алгоритма методики, предложенная в работе [2], показана на рисунке. Таким образом, приведенная инженерная методика позволяет определить параметры режима ТВО, при которых будет соблюдаться условие безопасности.

На основании проведенного исследования сформулированы рекомендации по совершенствованию режимов ТВО и применению методики в инженерных расчетах.

1. Для назначения параметров режимов ТВО сплошных плоских бетонных и железобетонных изделий в пропарочных камерах следует руководствоваться не только данными экспериментальной проверки параметров, но и расчетами по разработанной математической модели процессов тепло- и массообмена [3]. Это позволит снизить энергозатраты на постановку и проведение экспериментов и сократить длительность процедуры назначения параметров режимов ТВО.

2. Для каждого вида заполнителя бетона следует проводить лабораторные эксперименты по определению значений коэффициентов модели.

3. Для изделий, у которых прогнозируется усадка бетона в поверхностных слоях, следует предусмотреть увлажнение поверхностей, выдержку до заданного срока в камерах с нормальными температурно-влажностными условиями, укрытие поверхностей влагонепроницаемыми материалами или переход к более безопасным термосным или комбинированным



Рисунок. Блок-схема алгоритма применения методики расчета режимов ТВО

режимам обработки, где перепады влажностного содержания менее значительны.

4. Для снижения перепадов влажностного содержания по сечению изделий рекомендуется использовать цементы низких марок при одинаковом удельном расходе или снижать расход цемента заданной марки, но при условии обеспечения требуемой прочности. Также рекомендуется снижение отношения $U_0/U_{\max}$ до 0,9, т. е. сокращение расхода воды в бетонной смеси на 10 %, снижение температуры изотермической выдержки или применение термосных режимов со сниженной температурой термосного разогрева.

5. Начальная температура бетонной смеси по-разному влияет на перепады температуры и влажностного содержания. Повышение начальной температуры бетонной смеси уменьшает перепад температуры, но увеличивает перепад влажностного содержания. Таким образом, необходимо проводить процедуру оптимизации этого параметра.

6. Методика рекомендована для расчета изотермических и термосных режимов ТВО сплошных плоских изделий из тяжелых и легких конструктивных бетонов на основе портландцементов марок М200–М600 с активными минеральными добавками и без них, формуемых в стальных формах с открытым верхом (плит перекрытий, дорожных плит, стеновых панелей, стеновых блоков, лестничных площадок, бортовых камней и др.) и обрабатываемых в ямных и вертикальных пропарочных камерах.

Методика расчета режимов ТВО реализована в среде Mathcad в виде программы, защищенной свидетельством о государственной регистрации про-

граммы для ЭВМ № 2014617851 от 05 августа 2014 г. [1].

Сравнение разработанной и традиционной методики расчета режимов по расходу тепловой энергии, электроэнергии и затратам времени, которые необходимы для назначения параметров режима в лабораторных условиях, выполнено в работе [4] на примере изделия в форме плиты с размерами 2,4×1,2×0,15 м при следующих исходных данных: расход портландцемента марки М400-Д20 – 320 кг/м³; песка – 700 кг/м³; шлакового щебня из доменного шлака фр. 5–20 – 1100 кг/м³; воды – 149 дм³/м³; арматуры – 40 кг/м³. Марка бетона М 350, класс прочности на сжатие В25, марочная прочность в возрасте 28 сут – 32,1 МПа, проектная прочность через 0,5 ч после ТВО – 70 % от нормативной. Согласно рекомендациям [6], [7] назначены режимы ТВО:

1) изотермический 1+3+4+2 (ч) со следующими параметрами: начальной температурой бетона $t_0 = 20$ °С и окружающей среды $t_{CP} = 25$ °С; температурой изотермической выдержки $t_{ИЗ} = 85$ °С; скоростью подъема и снижения температуры среды в камере $w_{1T} = 20$ °С/ч и $w_{2T} = 22,5$ °С/ч соответственно;

2) термосный 1+4+15 (ч), со следующими параметрами: начальной температурой бетона $t_0 = 20$ °С и окружающей среды $t_{CP} = 25$ °С; температурой термосного разогрева $t_p = 85$ °С; скоростью подъема и снижения температуры среды в камере $w_{1T} = 15$ °С/ч и $w_{2T} = 3$ °С/ч соответственно. Назначенные параметры необходимо проверить экспериментально.

Для проверки необходимо провести 5 экспериментов для определения оптимальной скорости нагрева из следующих скоростей: 15, 20, 25, 30, 35 °С/ч. Соответственно длительность периода подогрева будет 4; 3; 2,4; 2; 1,7 ч. Пусть выбрана длительность подогрева 3 ч, тогда необходимо провести 5 экспериментов для определения оптимальной длительности изотермической выдержки из следующих: 3; 3,5; 4; 4,5; 5 ч. Длительность вспомогательных операций, включающих подготовку образцов (1 ч), распалубку и выдерживание после ТВО (4 ч), физико-механические испытания (0,5 ч), анализ графиков (0,5 ч), составляет 6 ч. Экономические показатели сравниваемых методик и общая длительность экспериментов представлена в табл. 2.

Таблица 2

Экономические показатели внедрения методики в расчете на одну партию изделий

Наименование показателей	Методика	
	традиционная	разработанная
1. Среднее время назначения параметров режима, ч.	314	203
2. Средние затраты электроэнергии в лабораторных экспериментах по назначению параметров режима:		
кВт·ч	221	93,5
руб. ¹	442	187
Примечание: Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии принята равной 2 руб.		

Электроэнергия потребляется лабораторной пропарочной камерой, где образцы подвергаются ТВО. Средняя мощность, потребляемая лабораторной пропарочной камерой, составляет 4 кВт. Электроэнергия потребляется только в период подогрева и изотермической выдержки, причем в последнем случае нагреватель периодически отключается.

При использовании разработанной методики экспериментально необходимо определять: коэффициент теплопроводности бетона, коэффициент диффузии воды в бетоне, максимальное влагосодержание. Определение коэффициентов теплопроводности и диффузии для бетона включает следующие операции: изготовление образцов, ТВО, распалубка и подготовка к исследованию, сушка до нулевой влажности, исследование, обработка экспериментальных данных. Максимальное влагосодержание определяется на тех же образцах, что и коэффициент диффузии, после всех операций. Все данные приведены для методик и оборудования, которое использовано в данной работе для партии изделий, включающей 7 образцов.

Из данных табл. 2 следует, что суммарное время, затрачиваемое на все операции, для разработанной методики в 1,5 раза меньше, чем для традиционной методики. В предлагаемой методике некоторые операции можно проводить параллельно друг другу, за

счет этого сокращается общая длительность назначения режима. В традиционной методике параллельные эксперименты возможны только при наличии двух лабораторных пропарочных камер, но и тогда длительность этих экспериментов будет все же больше, чем в случае предлагаемой методики.

Из данных табл. 2 следует, что при использовании предлагаемой методики экономия электроэнергии в расчете на одну партию изделий составляет 127,5 кВт·ч, т. е. затраты электроэнергии снижаются в 2,36 раза; суммарное время, затрачиваемое на все операции, в 1,5 раза меньше.

Относительный экономический эффект от сокращения длительности подготовки производства за счет внедрения разработанной методики рассчитан по формуле:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_0} = T_{n_0} - T_{n_1},$$

где $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_0$ – годовой экономический эффект от сокращения длительности подготовки производства и от выпуска новой продукции соответственно, руб.; T_{n_0} , T_{n_1} – период подготовки производства до и после проведения мероприятий по совершенствованию подготовки производства (внедрение методики), лет.

Выводы.

Относительный экономический эффект от сокращения длительности подготовки производства за счет внедрения разработанной методики увеличится на 3,8 %.

Расчет по предлагаемой методике сокращает трудозатраты специалистов-проектировщиков и дает экономии энергоресурсов (электроэнергия) при подготовке производства. Объектами для внедрения методики и результатов исследования являются проектные организации, занимающиеся разработкой и совершенствованием режимов ТВО, также рекомендуется использовать методику в учебном процессе в вузах.

Таким образом, разработана расчетно-экспериментальная методика расчета режимов ТВО сплошных плоских бетонных и железобетонных изделий, которая может использоваться при проектировании режимов ТВО в ямных и вертикальных пропарочных камерах. Определены области практического применения методики. Даны рекомендации по назначению режимов ТВО и применению методики в инженерных расчетах.

Литература

1. Аксенчик К. В., Шестаков Н. И. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617851 «Программа для моделирования и расчета процесса тепловлажностной обработки сплошных плоских бетонных и железобетонных изделий и назначения режимов их тепловлажностной обработки». Правообладатель: ФГБОУ ВПО «Череповецкий государственный университет». – 2014. – 5 августа.

2. Аксенчик, К. В. Комплексная методика назначения режимов тепловлажностной обработки бетона / К. В. Аксенчик // Материалы VI ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых по отраслям наук. – Т. 1: Технические науки. – Вологда, 2012. – С. 248–255.

3. Аксенчик, К. В. Математические модели процессов тепло- и массообмена и напряженного состояния при тепловлажностной обработке бетона / К. В. Аксенчик // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: Сборник материалов I Международной научно-практической конференции. – Новосибирск, 2012. – С. 120–126.

4. Аксенчик, К. В. Энергосбережение при назначении режимов тепловлажностной обработки бетона / К. В. Ак-

сенчик // Инновационное развитие территорий: Материалы I Международной (заочной) конференции. – Череповец, 2013. – С. 31–33.

5. Александровский, С. В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести / С. В. Александровский. – М., 1966.

6. Пособие по тепловой обработке сборных железобетонных конструкций и изделий (к СНиП 3.09.01-85). – Введ. 1986-07-08. – М., 1989.

7. Рекомендации по тепловой обработке тяжелых бетонов с учетом активности цемента при пропаривании. – М., 1984.

УДК 004.89, 519.2, 519.85

С. В. Ендияров

ОАО «Уралмашзавод»,

С. Ю. Петрушенко

НПО «Новатор» (г. Екатеринбург)

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА, ОПИСЫВАЕМОГО МНОГОМЕРНЫМ ВЕКТОРОМ ИЗМЕРЕНИЙ

В данной статье предлагается метод отбраковки и восстановления результатов многомерных измерений, находящихся под действием аномальных воздействий. Особенностью предлагаемой методики является возможность учета изменения состояния объекта управления, т. е. эффективной работы с нестационарными временными рядами.

Управление, агломерация железных руд, диагностика, оптимизация.

In this article we describe mathematical models which can be used to reduce uncertainty of multidimensional measurements which characterize industrial processes. The characteristic of the proposed technique is considered to be an ability to work with non-stationary multidimensional data which come from processes.

Control, iron ore sintering, condition monitoring, optimization.

Введение.

В последние годы во время ремонтов и реконструкций производств проводится модернизация технических средств сбора, обработки и представления информации. Многократно увеличилась мощность и надежность средств вычислительной техники и коммуникаций, существенно изменились терминальные устройства отображения технологической информации.

Однако создаваемые при этом автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП), как правило, мало помогают технологам в управлении процессом производства в части выдачи рекомендаций о повышении его эффективности. Например, агломерационные производства предприятий стран СНГ оснащены базовым уровнем автоматизации (нижние уровни АСУ ТП). Только присоединив к ним верхний уровень (уровень оптимизации процесса по средствам математического моделирования), можно решать технологические задачи управления процессом производства агломерата.

Кроме проблем, связанных с построением адекватного математического описания систем верхнего

уровня, возникают и проблемы повышения достоверности контроля технологических показателей ввиду повышенных требований разрабатываемых моделей к точности информации поступающей на их вход.

Проблема успешного функционирования систем верхнего уровня в условиях существующих производств заключается, таким образом, в наличии так называемых аномальных выбросов, воздействие которых на систему оптимизации производства может привести как к ухудшению качества ее функционирования и, как следствие, ухудшению качества готовой продукции, так и к выходу системы из строя и необходимости перехода на работу в ручном режиме.

Проблема обнаружения изменения свойств стохастических сигналов и динамических систем впервые возникла в конце 50-х гг. XX в. и к настоящему времени превратилась в интенсивно развивающееся направление математической статистики, которое находит широкое применение в таких важных областях, как геофизика, медицинская и техническая диагностика, контроль технологических процессов, обработка сигналов и т. д. [1].