Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Институт «Архитектурно-строительный»
Кафедра «Строительное производство и теория сооружений»

РАБОТА (ПРОЕКТ) ПРОВЕРЕНА
Рецензент, нас б-ю труд. обмен
(должность)
(И.О. Ф.)
2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой СПТС
(Г.А. Пикус)
06. 2018 г.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ БЕТОНА В ЗИМНЕЕ ВРЕМЯ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ-08.04.01.2018.279.ПЗ ВКР

Руководитель проекта
Зав. кафедрой СПТС
(Пикус Г.А.)
2018 г.

Автор проекта
студент группы АСИ-279
(Коровникова А.В.)
2018 г.

Нормоконтроль
Зав. кафедрой СПТС
(Пикус Г.А.)
2018 г.

Антиплагиат
Оригинальность – 87,8 %

(Пикус Г.А.)
2018 г.

Челябинск 2018

АННОТАЦИЯ

Коровникова А.В. Теоретические основы прогнозирования поведения бетона в зимнее время. – Челябинск: ЮУрГУ, АС- 279, с. 61, 5 табл., 14 рис., библиогр. список – 31 наим.

Цель выпускной квалификационной работы – разработать математический аппарат для прогнозирования температурных параметров выдерживания бетона в зимнее время.

Задачи выпускной квалификационной работы – определение расчетной температуры наружного воздуха, вывод формулы времени остывания бетона конструкции, оптимизация коэффициента теплопередачи ограждающей конструкции бетона, определение минимально необходимого количества контрольных температурных точек, оценка влияния температуры на рост прочности бетона, оценка допустимого перепада температур по сечению бетона конструкции.

Содержание

Введение....4
1. Анализ патентов по теме ВКР. 5
1.1.1. Техническое задание к патентному поиску....5
1.1.2. Дополнительный блок информации к техническому заданию. 6
1.2.1. Патент «Способ ультразвукового контроля прочности тяжелых бетонов в конструкциях». 8
1.2.2. Патент «Способ контроля прочности изделий из твердых материалов».10
1.2.3. Патент «Способ контроля прочности изделий из твердых материалов».12
1.2.4. Патент «Способ контроля прочности бетона»....14
1.2.5. Патент «Способ определения прочности бетона методом неразрушающего контроля и устройство для его осуществления»....15
1.2.6. Патент «Способ контроля за нарастанием прочности бетона при тепловой обработке»....17
1.2.7. Патент «Устройство оперативного контроля прочности бетона». 18
1.2.8. Патент «Устройство для автоматического управления процессом тепловой обработки бетона в термоактивных опалубках»....20
1.2.9. Патент «Способ возведения монолитных бетонных и железобетонных конструкций». 22
1.2.10. Патент «Способ автоматизированного управления процессом тепловой обработки бетона в условиях открытой строительной площадки». 23
2. Прогнозирование технологических параметров выдерживания бетона....27
2.1. Расчетные климатические параметры. 27
2.2. Время выдерживания бетона. 31
2.3. Температура бетона 35
2.4. Количество контрольных температурных точек 40
2.5. Влияние температуры на рост прочности бетона....43
2.6. Назначение требуемой прочности бетона. 46
2.7. Термонапряженное состояние бетона конструкции. 53
Заключение 59
Библиографический список 60

Введение

За последние 90 лет процесс укладки и выдерживания бетона в условиях отрицательных температур прошел длительный путь эволюции: от полного запрещения, до безоговорочного применения. Эволюционный путь развития не позволяет останавливаться на достигнутом. Многие способы и даже методы зимнего бетонирования претерпели серьезные изменения, а некоторые, несмотря на свои достоинства, все же исчезли.

Фундаментальные исследования в этой области были проведены еще советскими учеными, и размах многих вызывает пиетет у их современных последователей. На текущем этапе, развитие технологии зимнего бетонирования идет по пути стандартизации, внедрения компьютерного контроля и прогнозирования поведения бетона, оптимизации существующих методов.

Конечно, масштабы исследований, в первую очередь, определяются объемом финансирования, и если во времена СССР государство щедро оплачивало строительную науку, то на сегодня размеры грантов не обеспечивают должного уровня разработок и не позволяют своевременно обновлять парк научного оборудования. Более того, не стоит забывать, что научные исследования должны выполняться для нужд производства. Однако, в отличие от советской организации строительного рынка, когда доминировали тресты и главки, современный рынок по своей структуре насыщен небольшими строительными организациями, которые, зачастую, не способны и не мотивированы к решению сложных научных задач. Поэтому серьезная роль в стимулировании научных исследований, в том числе в области зимнего бетонирования, должна отводиться крупным строительным объединениям. Так, благодаря позиции НОСТРОЯ и ряда саморегулируемых организаций идет финансирование разработки стандартов в области зимнего бетонирования. Однако, многие фундаментальные вопросы теории зимнего бетонирования, которые лежат в основе данных стандартов до сих пор точно не исследованы, а предлагаемые методики носят, в основном, эмпирический характер. Данная работа – попытка аналитически подойти к решению ряда задач зимнего бетонирования.

1. Анализ патентов по теме

1.1.1. Техническое задание к патентному поиску

А) Перечень исходных данных.

- существующие методы ведения контроля прочности бетона при зимнем бетонировании.

Б) Порядок выполнения работы.

- произвести патентный поиск по данной теме;

- проанализировать существующие методы контроля прочности бетона при зимнем бетонировании;

- определить, какие изменения вошли в основу создания новых патентов по данной теме;

- описать результаты введенных изменений;

- определить, какие принципы устранения технических противоречий и законы развития технических систем были применены;

- определить, уровень технического решения.

В) Основные требования к техническим решениям.

Необходимо привести методы контроля прочности бетона при зимнем бетонировании, которые позволят обеспечить:

- равномерность распределения температур по объему конструкции,

- улучшить качество монолитных конструкций;

- повысить надежность строительных конструкций;

- снизить трудоемкость.

1.1.2. Дополнительный блок информации к техническому заданию

1. Наименование проблемы.

В настоящее время в области строительства актуальна проблема ведения строительно-монтажных работ в зимнее время из-за специфики процессов зимнего бетонирования, поэтому в процессе твердения бетона необходимо проводить мероприятия по контролю прочности.

2. Где возникла проблема?

Данная проблема возникла в сфере строительства.

3. Что именно плохо?

Отсутствует применение инновационных технологий при ведении контроля прочности бетона при зимнем бетонировании, которые помогали бы отслеживать большие температурные перепады по объему конструкции, повышать качество и надежность монолитных бетонных конструкций.

4. Что именно происходит? В какое время?

В процессе твердения бетона в зимнее время вследствие значительных температурных перепадов по объему конструкции происходит движение влаги, а она, в свою очередь, создает избыточное давление в порах бетона.

5. Последствия.

Данный факт может негативно сказываться на формирующейся структуре бетона, тем самым разрушить его.

6. Какие есть способы решения проблемы и по каким причинам они не используются?

Подбор подходящих методов для ведения контроля прочности при зимнем бетонировании, при которых будет соблюдаться допустимый перепад температур. Данное решение не используется из-за отсутствия методик расчета допустимых перепадов температур.

7. Конечная цель решения проблемы

Разработка новых методов для ведения контроля прочности при зимнем бетонировании, которые помогали бы отслеживать большие температурные перепады по объему конструкции.

8. Ограничения, доступные ресурсы.

Отсутствие нормативной базы, в которой бы прописывались требования по разработке данных методов контроля.

9. Допустимые издержки на реализацию решения.

Необходимо проводить исследования и ставить эксперименты в области разработки новых методов контроля прочности бетона при зимнем бетонировании. Также необходимо выявить закономерность допустимого перепада температур по объему конструкции.

10. Убыток, если решение не будет найдено?

Из-за отсутствия полноценного контроля прочности бетона конструкция может разрушаться вследствие неравномерности распределения температур по объему конструкции.

Изготовляют эталонные образцы из высокопрочного бетона, определяют значения прочности бетона и скорости ультразвуковых колебаний (УЗК) в эталонных образцах, регистрируют изменение скорости УЗК при различных интенсивностях УЗК, вводимых в эталонные образцы, строят зависимости прочности эталонных образцов на сжатие от изменения скорости УЗК в образцах, определяют значения максимальной прочности бетона в эталонных образцах путем экстраполирования полученной зависимости прочности эталонных образцов на сжатие от изменения скорости УЗК в образцах до нулевого значения изменения скорости УЗК в образцах, измеряют время и скорость ультразвуковых колебаний при отрицательных температурах окружающей среды и наличии кристаллов льда в порах бетона в контролируемых участках конструкции, определяют среднюю влажность бетона в эталонных образцах и в контролируемых участках конструкции, а искомую прочность бетона рассчитывают в зависимости от влажности и наличия кристаллов льда в его порах из выражения:

$$R = R_0 \frac{C_j\left(1 - 0{,}0205 \cdot W_j^{1,21}\right)}{8{,}87 \cdot C_0\left(1 - 69 \cdot 10^{-5} W_0^{3,1}\right) - 7{,}87 \cdot C_j\left(1 - 0{,}0205 \cdot W_j^{1,21}\right)},$$

где R - расчетная прочность бетона на сжатие в контролируемом j-м участке конструкции, МПа;

R_0 - максимальная прочность бетона в эталонных образцах, МПа;

C_j - средняя скорость распространения ультразвука в контролируемом j-м участке конструкции, м/с;

W_j - средняя влажность бетона в контролируемом j-м участке конструкции, % (по массе);

C_0 - скорость распространения ультразвука в эталонных образцах, соответствующая максимальной прочности бетона, м/с;

W_0 - средняя влажность бетона в эталонных образцах, % (по массе).

В) Результат изменения

Повышение точности и надежности определения прочности тяжелых бетонов повышенной влажности при отрицательных температурах и наличии кристаллов льда в их порах.

Г) Использованный прием для решения

Принцип использования механических колебаний.

Д) Закон развития технических систем в решении

Принцип повышения динамичности.

Е) Уровень технического решения

Второй уровень.

1.2.2. Патент «Способ контроля прочности изделий из твердых материалов»

А) Схема прототипа

Наиболее близким, принятым за прототип, является способ определения прочности, основанный на использовании явления генерирования электромагнитной эмиссии твердыми телами при их слабом ударном возбуждении. Согласно способу контролируемое изделие подвергают механическому воздействию с помощью электромеханического ударного устройства с нормированной силой ударного возбуждения, измеряют амплитуду электромагнитного сигнала, характеризующую внутреннюю неоднородность изделия, с помощью Фурье-преобразования рассчитывают амплитудно-частотную характеристику электромагнитного сигнала, из которой определяют частоту основного максимума, измеряют длительность переднего фронта сигнала, характеризующую поверхностную твердость изделия, измеренные величины подставляют в аналитическую формулу и рассчитывают обобщенный параметр (Р):

$$P = t + \frac{A}{A_{\max}} \cdot \frac{1}{f},$$

где t – длительность переднего фронта электромагнитного сигнала, мкс,

А – амплитуда электромагнитного сигнала, В;

A_{max} – максимальная амплитуда электромагнитного сигнала (аппаратурная), В;

f – частота основного максимума спектральной характеристики электромагнитного сигнала, МГц;

сравнивают определенную таким образом величину с предварительно установленной эмпирической зависимостью, связывающей параметр Р с механической прочностью, по результатам сравнения определяют прочность

бетонной конструкции определяют по установленным предварительно зависимостям температурный коэффициент K_t, определяющий увеличение времени набора прочности этой марки бетона относительно времени набора той же прочности при температуре, равной 80°С. Прочность бетона, набранную за определенное время, определяют по формуле:

$$R = 100 - 82{,}09 \cdot e^{-0{,}961\tau \frac{1}{K_t}},$$

где R, % - прочность бетона, набранная за время τ;

K_t - температурный коэффициент, определяемый в зависимости от температуры твердения бетона и трехсуточной прочности бетона в нормальных условиях.

В) Результат изменения

Увеличение точности определения прочности бетона примерно на 10%, по сравнению с ближайшим аналогом.

Г) Использованный прием для решения

Принцип копирования.

Д) Закон развития технических систем в решении

Принцип повышения динамичности.

Е) Уровень технического решения

Второй уровень.

1.2.7. Патент «Устройство оперативного контроля прочности бетона»

А) Схема прототипа

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому эффекту к заявляемому устройству является устройство регулирования температуры и влажности при обработке железобетонных изделий в установках периодического действия, включающее нагреватель изделия, командный блок, регулятор температуры, датчики температуры.

Система: нагреватель, командный блок, регулятор и датчики температуры.

Надсистема: условия окружающей среды.

Система: 1 – блок управления; 2 - командный блок; 3 - вычислительное устройство; 4, 5 - регуляторы температуры; 6 - датчик скорости ветра; 7 - датчик температуры наружного воздуха ; 8, 9 - датчики температуры бетона в контактной зоне; 10 – датчик температуры бетона в теле конструкции; 11 - датчик прочности бетона; 12 - наружный щит термоопалубки; 13 – внутренний щит термоопалубки; 14 – конструкция.

Надсистема: условия окружающей среды.

Б) Введенное изменение

После включения блока управления 1 вырабатывается команда на включение датчиков температуры наружного воздуха 6 и скорости ветра 7, датчиков температуры бетона в контактной зоне с нагревателями 8 и 9, датчика 10 температуры бетона в теле конструкции 14.

Командный блок осуществляет запрос начальных параметров технологического процесса бетонирования (вид бетонируемого сооружения, конструктивные особенности термоопалубки, вид уложенной бетонной смеси, модуль поверхности конструкции). При отсутствии ввода таких параметров запрос повторяется.

После ввода начальных параметров вычислительное устройство 3, в соответствии с данными, поступающими на входы командного блока от датчиков температуры наружного воздуха 7, скорости ветра 6 и датчика температуры бетона в теле конструкции 10, определяет температурный режим термообработки.

Вычислительное устройство 3 передает информацию на седьмой вход командного блока. Командный блок 3 подает сигнал регуляторам температуры 4 и 5. Щиты термоактивной опалубки 12 и 13 начинают процесс термообработки бетона конструкции 14.

Регуляторы температуры 4 и 5 поддерживают и ограничивают заданные вычислительным устройством 3 значения температуры.

Во время термообработки датчик скорости ветра 6, датчик температуры наружного воздуха 7, датчик температуры бетона 10 в теле конструкции, датчики температуры бетона в контактной зоне с термоактивной опалубкой 8 и 9, постоянно подают информацию на входы командного блока. При резких

бетона, включающий нагрев уложенной смеси путем подачи теплоносителя, измерение температуры смеси, ограничение температуры ее поверхностного слоя путем изменения подачи теплоносителя в процессе тепловой обработки, выдерживание бетона до набора требуемой прочности, отличающийся тем, что измеряют температуру наружного воздуха и скорость ветра и в зависимости от этих параметров, а также в зависимости от вида бетонируемого сооружения (модуль поверхности), конструктивных особенностей опалубки (площадь, утепление, наличие мостиков холода), вида уложенной бетонной смеси (класс бетона, марка и вид цемента, наличие добавок), формируют оптимальный температурно-временной график тепловой обработки бетона, определяют необходимую максимальную электрическую мощность $P^{Т.О}_{макс}$ для реализации процесса тепловой обработки в соответствии с сформированным температурно-временным графиком, а энергообеспечение строительной площадки осуществляют согласно условиям:

$$\begin{cases} P^{лим}_{макс} - P_n \geq P^{Т.О.}_{макс} \\ P^{Т.О.}_{макс} \geq P^{Т.О.}_{i} \end{cases},$$

где $P^{лим}_{макс}$ – лимит электроэнергии, отпускаемой строительной площадке;

P_n – электрическая мощность потребителей строительной площадки за исключением установок тепловой обработки бетона;

$P^{Т.О.}_{макс}$ – максимальная электрическая мощность, потребляемая установками тепловой обработки бетона;

$P^{Т.О.}_{i}$ – текущее значение электрической мощности, необходимой для реализации сформированного температурно-временного графика тепловой обработки бетона, а при невыполнении условий ограничивают энергопотребление P_n или корректируют температурно-временной график тепловой обработки бетона.

В) Результат изменения

Повышение производительности труда при уменьшении трудоемкости и повышении качества строительства.

Г) Использованный прием для решения

Принцип местного качества.

Д) Закон развития технических систем в решении

Принцип повышения динамичности.

Е) Уровень технического решения

Второй уровень.

2. Прогнозирование технологических параметров выдерживания бетона

2.1. Расчетные климатические параметры

На 69% территории России зима длится более полугода, а средняя годовая температура по стране составляет минус 5,5 градусов. Поэтому возведение монолитных конструкций в зимних условиях – суровая необходимость для российских строителей.

Вопросами учета климатических параметров в технологии производства строительных работ в зимнее время человечество занимается уже многие столетия. Так, в Урочном положении для строительных работ от 1869 года [30] вся территория России разделена на три полосы – северную (лежащую за 56 градусом широты), среднюю (от 56 до 51 градуса широты), и южную (до 51 градуса широты). Для нас интерес представляет северная полоса, хотя в ее границы входили, по нынешним меркам, далеко не северные города, такие как Москва, С-Петербург, Владимир и т.п. Следует отметить, что в настоящее время, в соответствии с ЕНиР [13] территория России разделена на 6 температурных зон, причем деление идет не только по широте, но и по долготе.

Естественно, что зимние условия производства работ формируются в разных географических широтах не одновременно. Согласно данного Урочного положения зимним временем считалось:

- в северной полосе: с 16 ноября по 1 апреля (4,5 месяца);
- в средней полосе: с 1 декабря по 16 марта (3,5 месяца);
- в южной полосе: с 16 декабря по 1 марта (2,5 месяца).

Интересно, что согласно действующих в настоящее время норм [8] в городах Москва, Санкт-Петербург, Владимир зимний период продолжается с 5 ноября по 5 апреля (5 месяцев), однако данные территории относятся к III температурной зоне (из 6), т.е. далеко не самой северной.

При этом понимая сложности зимних условий производства работ, в [30] указано, что рабочий день в зимнее время должен быть сокращен с 12 часов (для летнего времени) до 8 часов, а на каждого рабочего, определенного для летнего

времени, добавлять в зимний период 0,5 человека (т.е. вместо двух рабочих использовать труд 3-х рабочих).

Необходимость корректировки трудозатрат на производство работ в зимнее время обусловлена как тогда, так и сейчас, снижением производительности труда за счет:

- скованности движений, из-за наличия теплой спецодежды и обуви;
- медленным перемещением рабочих по скользким поверхностям;
- необходимости очистки рабочих зон и конструкций от снега и льда;
- потребности в кратковременных обогревах рабочих;
- возможности полного прекращения работ при предельно низких температурах.

Кроме того, следует учитывать повышенную заболеваемость в зимнее время, что требует увеличения количества рабочих (что, отчасти и было учтено в Урочном положении).

В качестве расчетных климатических параметров принимают температуру наружного воздуха и скорость ветра. Здесь следует учитывать, что данные параметры будут отличаться друг от друга на стадии разработки проекта производства работ (технологической карты) и на стадии прогнозирования поведения бетона уже уложенного в конструкцию. И если для первого случая, климатические параметры принимаются разработчиком ППР (ТК) по СП 131.13330.2012 «Строительная климатология» [28], то для второго – принимаются ответственным за производство бетонных работ в зимнее время в строительной организации по данным метеопрогноза.

В СП 131.13330.2012 [28] приведено достаточно много различных температур, например, для Челябинска:

– абсолютная минимальная температура воздуха (-48°С);

– температура воздуха наиболее холодных суток (-39°С);

– температура воздуха наиболее холодной пятидневки (-35°С);

– среднемесячная температура воздуха в заданном месяце (ноябрь -6,2 °С; декабрь -12,9°С; январь -15,8°С; февраль -14,3°С; март -7,4°С).

Конечно, применение в качестве расчетной температуры наружного воздуха очень низких значений температуры, например, абсолютной минимальной температуры воздуха, будет не оправдано с экономической точки зрения. С другой стороны, высокие температуры – среднемесячные температуры воздуха в заданном месяце позволяют дифференцированно распределять температуры во времени, однако они не учитывают возможные колебания температур в течение месяца, что может привести к необратимым последствиям, вплоть до замораживания бетона.

Для учета колебаний температур в течение месяца можно воспользоваться данными по максимальной амплитуде колебаний суточной температуры в заданном месяце, которые приведены в СП 131.13330.2012 [28]. Объединим все данные на рис. 2.1.1.

Тогда можно предложить следующую формулу для определения расчетной температуры наружного воздуха в заданном месяце на стадии разработки проекта:

$$t_{н.в} = t_{н.в}^{ср} - \frac{\Delta t_{\max}}{2},$$

где $t_{н.в}^{ср}$ – среднемесячная температура наружного воздуха, °С, в заданном месяце;

$\Delta t_{\max}$ – максимальная амплитуда колебаний суточной температуры, °С, в заданном месяце.

На стадии прогнозирования поведения бетона, уже уложенного в конструкцию, расчетную температуру наружного воздуха можно определить аналогично, но по данным метеостанций, приведенных на соответствующих сайтах. Например, рассмотрим прогноз погоды, представленный на рис. 2.1.2.

Допустим, мы предполагаем выдерживать бетон в течение трех суток с 4 по 6 апреля. Тогда среднесуточная температура наружного воздуха на период прогноза составит:

$$t_{н.в}^{ср} = \frac{-3-11-4-7-3-6}{6} = -5{,}7\,°\text{C}.$$

Максимальная за период прогноза амплитуда колебаний суточной температуры составляет $\Delta t_{\max} = 8\,°\text{C}$ (11°C – 3°C). Следовательно, расчетная температура на период прогноза будет:

$$t_{н.в} = -5{,}7 - \frac{8}{2} = -9{,}7\,°\text{C}.$$

2.2. Время выдерживания бетона

Одним из технологических параметров зимнего бетонирования является время выдерживания бетона конструкции. И если для активных методов зимнего бетонирования время выдерживания может быть задано на стадии проекта, то для пассивных методов – время остывания бетона необходимо определять расчетным путем.

Для оценки времени остывания бетона можно воспользоваться известным законом Ньютона: скорость изменения температуры тела пропорциональна разнице между температурой тела и температурой окружающей среды. Таким образом, можно записать дифференциальное уравнение:

$$\frac{dt}{d\tau} = \left(t - t_{н.в}\right) \cdot k\,. \qquad (2.2.1)$$

Данное уравнение можно переписать в виде

$$d\tau = \left(\frac{1}{k \cdot t - k \cdot t_{н.в}}\right) \cdot dt\,.$$

Интегрируя, получим:

$$\tau = \frac{1}{k} \ln C\left(k \cdot t - k \cdot t_{н.в}\right). \qquad (2.2.2)$$

Раскроем натуральный логарифм.

$$C(k \cdot t - k \cdot t_{н.в}) = e^{k \cdot \tau}. \qquad (2.2.3)$$

Определим значение постоянной C, используя следующее граничное условие: в начальный момент времени ($\tau = 0$) температура бетона равна $t_{б.н}$. Тогда

$$C(k \cdot t_{б.н} - k \cdot t_{н.в}) = e^{0}.$$

Отсюда

$$C = \frac{1}{k \cdot (t_{б.н} - t_{н.в})}.$$

Тогда уравнение (2.2.3) примет вид:

$$\frac{t - t_{н.в}}{t_{б.н} - t_{н.в}} = e^{k \cdot \tau}.$$

Определим значение коэффициента пропорциональности k используя второе граничное условие: через время $\tau = \tau_x$ температура бетона снизилась до $t = t_x$. Тогда

$$\frac{t_x - t_{н.в}}{t_{б.н} - t_{н.в}} = e^{k \cdot \tau_x}.$$

Отсюда

$$k = \frac{\ln\left(\frac{t_x - t_{н.в}}{t_{б.н} - t_{н.в}}\right)}{\tau_x}.$$

Подставив значение коэффициента пропорциональности в формулу (2.2.2), получим формулу для оценки времени остывания бетона от температуры $t_{б.н}$ до температуры $t_{б.к}$ при температуре наружного воздуха $t_{н.в}$:

$$\tau_{ост} = \frac{\tau_x}{\ln\left(\frac{t_x - t_{н.в}}{t_{б.н} - t_{н.в}}\right)} \cdot \ln\left(\frac{t_{б.к} - t_{н.в}}{t_{б.н} - t_{н.в}}\right),$$

или

$$\tau_{ост} = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{t_{б.к} - t_{н.в}}{t_{б.н} - t_{н.в}}\right) = -\frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{t_{б.н} - t_{н.в}}{t_{б.к} - t_{н.в}}\right). \qquad (2.2.4)$$

Анализируя полученную формулу (2.2.4), можно увидеть, что коэффициент пропорциональности k определяет угол наклона кривой остывания в осях $\tau(t)$ и по своей сути определяет скорость остывания бетона.

Для примера решим задачу: после укладки бетона в конструкцию его температура оказалась 40°С. За какое время бетон остынет до температуры 0°С, если известно, что через полчаса температура бетона составила 35°С, а температура наружного воздуха в процессе выдерживания равна -10°С?

Решение:

1. Определим коэффициент пропорциональности

$$k = \frac{\ln\left(\frac{35+10}{40+10}\right)}{0{,}5} = -0{,}2107\,.$$

2. Время остывания составит:

$$\tau_{ост} = \frac{1}{0{,}2107} \cdot \ln\left(\frac{40+10}{0+10}\right) = 7{,}64 \text{ часа.}$$

Интересно, что С.Г. Головневым [6, 7] была получена аналогичная формула, но был использован графоаналитический метод, с элементами эмпирических уточнений. В формуле С.Г. Головнева использован такой параметр, как темп остывания m, а также коэффициент 1,33, который учитывает иррегулярную стадию остывания:

$$\tau_{ост} = \frac{1{,}33}{m} \cdot \ln\left(\frac{t_{б.н} - t_{н.в}}{t_{б.к} - t_{н.в}}\right). \qquad (2.2.5)$$

Вообще, в [6, 7] предложена эмпирико-аналитическая формула, для вычисления темпа остывания m, который зависит от целого ряда параметров. Однако, для чистоты анализа попробуем решить предыдущий пример, используя только имеющиеся данные. Так:

1. Темп остывания можно определить следующим образом:

$$m = \frac{1{,}33}{\tau_x} \cdot \ln\left(\frac{t_{б.н} - t_{н.в}}{t_x - t_{н.в}}\right) = \frac{1{,}33}{0{,}5} \cdot \ln\left(\frac{40+10}{35+10}\right) = 0{,}28026\,.$$

2. Время остывания:

$$\tau_{ост} = \frac{1{,}33}{0{,}28026} \cdot \ln\left(\frac{40+10}{0+10}\right) = 7{,}64 \text{ часа.}$$

Видно, что результаты расчета времени остывания по обеим формулам сходятся идеально. Следовательно, сравнивая формулу (2.2.5) с формулой, полученной нами (2.2.4), можно сделать вывод, что

$$m = -1{,}33k\,, \qquad (2.2.6)$$

а дифференциальный подход к выводу формулы для расчета времени остывания бетона – верным.

Конечно, в реальности, один из параметров, используемых в формуле (2.2.4) – температура наружного воздуха – подвержен систематическим колебаниям. На стадии прогноза технологических параметров зимнего бетонирования информацию об изменении температуры воздуха в период выдерживания бетона можно получить, как было сказано выше, на соответствующих интернет ресурсах. Например, на странице прогноза погоды сайта www.yandex.ru доступна информация о четырех температурах в течение суток: утро, день, вечер, ночь. То есть каждая температура действует в течение 6 часов.

Допустим, перед нами стоит задача определить время остывания конструкции, если известно, что через $\Delta\tau$ часов от начала остывания температура наружного воздуха изменилась с $t_{н.в1}$ на $t_{н.в2}$. Разобьем процесс остывания на два участка: первый – остывание при температуре $t_{н.в1}$, второй – при температуре $t_{н.в2}$. Воспользуемся формулой (2.2.4) для определения конечной температуры бетона на первом участке после остывания в течение $\Delta\tau$ часов (из курса математики помним, что если $\log_e N = x$, то $N = e^x$):

$$t_{б.к.1} = \frac{t_{б.н.} - t_{н.в.1}}{e^{-k\cdot\Delta\tau}} + t_{н.в.1}.$$

Конечная температура первого участка является начальной температурой второго участка. Таким образом, при температуре наружного воздуха $t_{н.в2}$ (второй участок) бетон будет остывать:

$$\tau_{ост2} = -\frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{t_{б.к.1} - t_{н.в2}}{t_{б.к} - t_{н.в2}}\right),$$

а общее время остывания составит

$$\tau_{ост} = \tau_{ост1} + \tau_{ост2} = \Delta\tau + \tau_{ост2}.$$

2.3. Температура бетона

Опыт выдерживания монолитных конструкций в зимнее время доказывает, что температурное поле по сечению бетона всегда неравномерное: наиболее охлаждаемые точки – углы конструкции, ее поверхность, а наименее подвержено охлаждению – ядро конструкции. Для определения температуры в любой точке бетона конструкции на определенный момент времени, можно воспользоваться дифференциальным уравнением Фурье [16]:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma}\left(\frac{d^2t}{dx^2} + \frac{d^2t}{dy^2} + \frac{d^2t}{dz^2}\right) + \frac{q_v}{c \cdot \gamma}. \qquad (2.3.1)$$

Данное уравнение связывает между собой изменение температуры во времени (τ), в пространстве (3-D координаты точки *x*, *y*, *z*), а также учитывает наличие внутреннего источника тепла в рассматриваемом теле (q_v). Остальные значения в формуле следующие: λ – коэффициент теплопроводности, c – удельная теплоемкость, γ – плотность материала.

Для понимания решим следующий пример (рис. 2.3.1): внутреннего источника тепла в бетоне нет ($q_v = 0$), задача одномерная ($y = z = 0$), задача стационарная (скорость изменения температуры $\frac{dt}{d\tau}$=0).

Тогда уравнение (2.3.1) примет вид:

$$\frac{d^2t}{dx^2} = 0.$$

В тоже время, важно не столько само значение абсолютной температуры бетона, сколько неравномерность распределения температур по сечению бетона, так как значительная неравномерность температур (большие перепады температур) приводит к неблагоприятному термонапряженному состоянию бетона конструкции.

В соответствии с теоремой Кондратьева [4] темп остывания конструкции выражается формулой:

$$m = \psi \frac{\alpha \cdot F}{C_v}, \qquad (2.3.4)$$

где ψ – коэффициент неравномерности распределения температур в теле конструкции;

α – коэффициент теплоотдачи поверхности конструкции;

F – площадь конструкции, через которую происходят потери тепла;

C_v – полная теплоемкость бетона.

Здесь

$$C_v = C \cdot \gamma \cdot V,$$

где V – объем бетона.

Таким образом, формула (2.3.4), с учетом того, что 1 Вт-час = 3,6 кДж, примет вид:

$$m = \psi \frac{3{,}6 \cdot \alpha \cdot F}{C \cdot \gamma \cdot V} = \psi \frac{3{,}6 \cdot \alpha \cdot M_n}{C \cdot \gamma}. \qquad (2.3.5)$$

В [6, 7] приведена формула темпа остывания, полученная и уточненная экспериментальным путем:

$$m = \frac{3{,}6 \cdot \alpha \cdot M_n}{C \cdot \gamma \cdot \left(1 + k_ф \frac{\alpha}{M_n \cdot \lambda}\right)}. \qquad (2.3.6)$$

Здесь $k_ф$ – коэффициент формы (для пластин $k_ф$ = 1,14).

Если сравнить формулы (2.3.5) и (2.3.6) мы увидим, что

$$\psi = \frac{1}{1 + k_ф \frac{\alpha}{M_n \cdot \lambda}}. \qquad (2.3.7)$$

При этом градиент температур между этими точками запишем так:

$$grad(t) = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{R}. \qquad (2.3.11)$$

Отсюда выразим минимальную температуру:

$$t_{\min} = R \cdot grad(t) - t_{\max}. \qquad (2.3.12)$$

Подставим получившееся выражение (2.3.12) в формулу (2.3.10):

$$t_{ср.v} = t_{\max} - \frac{grad(t) \cdot R}{2}.$$

Таким образом, приравняв формулы (2.3.7) и (2.3.8), а также с учетом, что для пластин

$$M_n = \frac{2}{a} = \frac{2}{2R} = \frac{1}{R},$$

получим:

$$\frac{t_{\max} - \frac{grad(t)}{2 \cdot M_n}}{t_{\max}} = \frac{1}{1 + k_ф \frac{\alpha}{M_n \cdot \lambda}}.$$

Из данной формулы можно получить важное значение – коэффициент теплопередачи, обеспечивающий допустимый перепад температур по сечению конструкции:

$$\alpha = \left(\frac{t_{\max}}{t_{\max} - \frac{grad(t)}{2 \cdot M_n}} - 1 \right) \frac{M_n \cdot \lambda}{k_ф}. \qquad (2.3.13)$$

Для примера, определим необходимый коэффициент теплопередачи ограждения бетона перекрытия для обеспечения максимального градиента температур 0,1°С/см = 10°С/м. Толщина перекрытия – 0,2 м, максимальная температура в бетоне 40°С. Тогда в соответствии с (2.3.10):

$$\alpha = \left(\frac{40}{40 - \frac{10}{2 \cdot 10}} - 1 \right) \frac{10 \cdot 2{,}6}{1{,}14} = 0{,}289 \text{ Вт/м}^2\text{°C}.$$

2.4. Количество контрольных температурных точек

Непрерывный рост объемов монолитного строительства в сочетании с необходимостью обеспечения качества и безопасности монолитных конструкций, особенно в зимнее время, требует поиска оптимальных решений по контролю за соблюдением технологических режимов выдерживания бетона.

Одними из наиболее распространенных, ответственных и трудоемких в изготовлении монолитных конструкций являются плитные конструкции (плиты перекрытия, покрытия, фундаментные плиты). Известно, что наиболее эффективным и достоверным средством контроля прочности бетона в зимнее время является систематическая регистрация температуры бетона в разных точках конструкции [19].

В нормативной литературе до недавнего времени не устанавливалось необходимое количество точек, именуемых температурными точками, в которых следует регистрировать температуру бетона. Лишь в Руководстве [21] указано на необходимость контролировать температуру не менее, чем в одной точке на 10 м^2 площади плиты. Но в появившемся в 2012 году СП 70.13330.2012 [27] сказано, что количество температурных точек в плитах перекрытия должно быть не менее одной на 4 м^2 перекрытия. Учитывая, что площадь монолитных перекрытий составляет сотни квадратных метров, то в этом случае количество температурных точек начинает превышать все мыслимые пределы, следствием чего является трудновыполнимость вышеуказанных рекомендаций и требований. В связи с этим возникает необходимость в разработке научно обоснованной методики оценки необходимого количество температурных точек для обеспечения качества и безопасности монолитных конструкций, возводимых в зимнее время.

Для разработки такой методики был применен феноменологический подход, в результате которого была предложена формула для определения минимально необходимого количества контрольных температурных точек в плитных конструкциях:

$$N_t = \frac{S}{20} \cdot n_t \cdot k_1 \cdot k_2, \qquad (2.4.1)$$

но не менее четырех точек.

Здесь S – площадь плиты, м^2;

n_t – количество температурных точек на 20 м^2 поверхности плиты;

k_1 – коэффициент, учитывающий толщину плиты;

k_2 – коэффициент, учитывающий температуру наружного воздуха.

Основным фактором, определяющим необходимое количество температурных точек, как нам кажется, должно быть время укладки бетона в конструкцию, так как от этого напрямую зависит распределение температур по плите. Чем быстрее будет изготовлена плитная конструкция, тем более равномерно будут распределяться температуры по ее объему, и, тем самым, потребуется меньшее количество температурных точек для оценки температурного поля.

Время укладки бетона в конструкцию (t_k) зависит от темпа его укладки, на который могут влиять целый ряд факторов: возможности прогревочного оборудования, производительность бетонорастворного узла, выработка рабочих и пр. Время укладки бетона может быть определено по формуле:

$$t_к = \frac{V_к}{V_{б.см}},$$

где $V_к$ – объем конструкции, м^3;

$V_{б.см}$ – темп укладки бетона, м^3/смену.

Необходимое количество температурных точек в зависимости от времени укладки бетона в плитную конструкцию предлагается определять по табл. 2.4.1.

Таблица 2.4.1

Количество температурных точек на 20 м^2 поверхности плиты

$t_к$, смен	До 0,25	0,25 … 0,5	0,5 … 0,75	0,75 … 1,0	Более 1,0
n_t, шт	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0

В соответствии с [6] можно выделить два параметра, определяющих неравномерность распределения температуры по сечению конструкции:

– параметрическая величина ψ:

$$\psi = \frac{t_{пов} - t_{н.в}}{t_v - t_{н.в}},$$

где $t_{н.в}$, $t_{пов}$, t_v – соответственно, температура наружного воздуха, температура на поверхности и средняя температура по объему конструкции;

– коэффициент неравномерности β:

$$\beta = k\,\frac{\alpha_{прив}}{\lambda_б \cdot M_п},$$

где k – коэффициент, равный 0,74 для активных методов зимнего бетонирования и 0,85 – для пассивных;

$\alpha_{прив}$ – коэффициент теплопередачи ограждения бетона;

$\lambda_б$ – коэффициент теплопроводности бетона (для тяжелого бетона $\lambda_б$=2,6 Вт/м·°С);

$M_п$ – модуль поверхности конструкции.

Учитывая, что для пластинчатых конструкций $M_п = \frac{2}{a}$, где a – толщина конструкции, и что выдерживание плит обычно ведется с применением активных методов зимнего бетонирования, получим:

$$\beta = 0{,}142 \cdot \alpha_{прив} \cdot a\,.$$

Из формулы видно, что коэффициент неравномерности прямо пропорционален толщине плитной конструкции и увеличивается с ростом толщины плиты. Это позволяет рекомендовать следующие значения коэффициента k_1 (табл. 2.4.2).

Таблица 2.4.2

Значения коэффициента k_1

Толщина плиты, мм	До 300	301 … 500	501 … 700	701 … 900	901 … 1200	1201 … 1500	Более 1500
k_1	1,0	1,17	1,23	1,30	1,40	1,50	2,0

Результаты расчета параметрической величины ψ показывают, что диапазон ее изменения при наиболее часто встречающихся температурах выдерживания плитных конструкций, не превышает 10%. На основании этого, в табл. 2.4.3 приведены рекомендуемые значения коэффициента k_2.

Таблица 2.4.3

Значения коэффициента k_2

$t_{н.в}$, °С	Выше -10	-10 … -20	Ниже -20
k_2	1,0	0,95	0,90

В качестве примера, рассмотрим контроль температуры монолитной плиты перекрытия толщиной 160 мм, площадью 400 м^2 бетонируемую в течение одной смены при температуре наружного воздуха -15°С. В соответствии с [21] для этого необходимо 40 температурных точек, а согласно [27] – 100. В соответствии с предлагаемой методикой потребуется $N_t = \frac{400}{20} \cdot 0{,}7 \cdot 1 \cdot 0{,}95 = 13$ температурных точек или одна точка на 30,8 м^2 плиты.

2.5. Влияние температуры на рост прочности бетона

Гидратация цемента – химическая реакция. А для большинства химических реакций справедливо утверждение о том, что с ростом температуры скорость реакции увеличивается [2]. Такой тип температурной зависимости скорости называется нормальным (рис. 2.5.1).

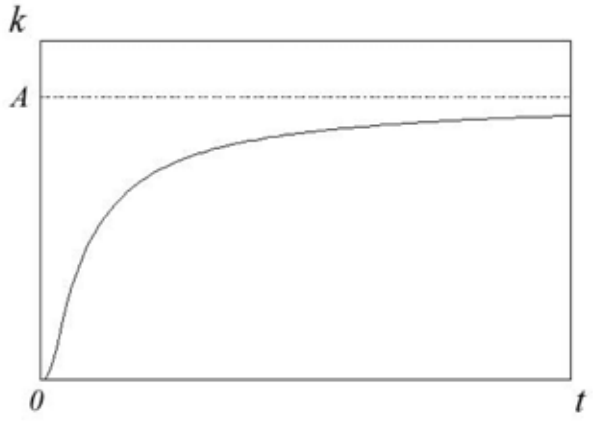

Рис. 2.5.3. Зависимость константы скорости реакции от температуры

Решая уравнение (2.5.2) для двух температур получим:

$$E_a = \frac{R \cdot t_1 \cdot t_2}{t_2 - t_1} \ln \frac{k_2}{k_1}. \qquad (2.5.3)$$

Рассмотрим из предыдущего примера две изотермы 20 и 40 °С. Тогда по (2.5.3) энергия активации химической реакции:

$$E_a = \frac{8{,}3143 \cdot 293{,}15 \cdot 313{,}15}{313{,}15 - 293{,}15} \ln \frac{15{,}2}{11{,}5} = 10645 \text{ Дж/моль.}$$

Определим во сколько раз увеличится скорость реакции, если температура увеличится с 20 до 50 °С:

$$\frac{k_{50}}{k_{20}} = \frac{A \cdot e^{-\frac{E_a}{Rt_{50}}}}{A \cdot e^{-\frac{E_a}{Rt_{20}}}} = e^{\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{t_{20}} - \frac{1}{t_{50}}\right)} = e^{\frac{10645}{8{,}3143}\left(\frac{1}{293{,}15} - \frac{1}{323{,}15}\right)} = 1{,}5 \text{ раза.}$$

Видно, что результаты расчета по уравнениям Вант-Гоффа и Аррениуса получились практически идентичными.

2.6. Назначение требуемой прочности бетона

В соответствии с действующими нормами [27], распалубку монолитных конструкций в зимнее время, а, следовательно, и замораживание бетона, можно производить при достижении бетоном требуемой прочности. При этом под требуемой прочностью следует понимать большее значение из критической или распалубочной прочности бетона.

Значения критической прочности (минимальной прочности бетона, по достижении которой бетон может быть заморожен, и это не скажется на его конечных физико-механических свойствах) зависят от класса бетона и составляют от 30 (для бетонов с классом по прочности при сжатии В30 и выше) до 50 % от проектной прочности бетона (для бетонов с классом по прочности при сжатии до В10). Данные величины не подлежат обсуждению, так как они являются минимально необходимыми, чтобы обеспечить восприятие механических напряжений в бетоне вследствие раннего замораживания бетона и увеличения объема жидкой фазы при переходе воды в лед. Т.е. должно выполняться условие $\sigma \leq R_t$.

Распалубочная прочность не зависит от класса бетона, а определяется конструктивными решениями. Например, для конструкций перекрытий, в зависимости от их пролета, распалубочная прочность назначается не менее 70% или не менее 80% от проектной прочности бетона [27]. Здесь мы видим неопределенность, связанную с использованием словосочетания «не менее». Т.е. распалубочная прочность может быть и выше указанных чисел. В перечне конструкций, для которых назначается распалубочная прочность, кроме перекрытий присутствуют еще преднапряженные конструкции (распалубочная прочность не менее 80%). Остальные конструкции, например такие, как колонны, стены, диафрагмы жесткости, балки и т.п., в нормах отсутствуют. Хотя, в уже не действующем нормативном документе [23] было указано, что распалубочная прочность любых несущих конструкций, загружаемых в процессе строительства хотя бы частью расчетной нагрузки, должна быть не менее 80%.

Помимо конструктивных решений на распалубочную прочность должен оказывать влияние и перепад температуры между температурами бетона и наружного воздуха. К сожалению, в настоящее время, нормативные документы не учитывают прочность бетона к моменту распалубки при назначении температурного перепада. Сейчас этот температурный перепад зависит только от массивности конструкции и процента ее армирования. Однако расчеты показывают [19], что в этом случае существующие нормы излишне жесткие и определяют максимальные перепады температур при распалубочной прочности

бетона составляющей около 20% от проектной (хотя как мы показывали выше, распалубка конструкций не допускается до набора бетоном как минимум критической прочности, т.е. не менее 30%). Таким образом, при значительном температурном перепаде распалубку конструкций нужно производить в более поздние сроки (при более высокой распалубочной прочности). Например, для железобетонных конструкции с модулем поверхности 5 м-1 и коэффициентом армирования до 1% нормируемый в настоящее время максимальный перепад температур составляет 20 ºС, хотя расчеты, выполненные при тех же условиях, свидетельствуют, что при перепаде температур между бетоном и наружным воздухом в 50 ºС (к примеру, температура бетона +30 ºС, а наружного воздуха -20 ºС) распалубочная прочность бетона должна быть как минимум 80%.

Вернемся к назначению требуемой прочности. Здесь необходимо в первую очередь ориентироваться на время выполнения монолитных работ и общую продолжительность зимнего периода. Так, если к возводимой конструкции не определены требования норм по распалубочной прочности (например, колонна) и она бетонируется в конце зимнего периода (например, в марте, если зимний период длится с начала ноября по конец марта), то можно предположить, что в качестве распалубочной прочности может выступать критическая прочность. Объяснение такому выбору прочности состоит в том, что в ближайшее время после бетонирования уже наступит потепление, конструкция оттает, и продолжит набирать прочность. При этом за столь короткий срок, в течение которого бетон был заморожен, напряжения от объема возведенных в оставшийся непродолжительный зимний период вышележащих конструкций могут быть сопоставимы с критической прочностью бетона. Допустимый объем возведенных вышележащих конструкций, скорее всего, будет естественным образом ограничен технологическими возможностями производителя работ или искусственно ограничен проектной организацией без каких-либо экономических последствий.

В случае, если подобная конструкция возводится в начале зимнего периода (для данного примера – в ноябре), то, скорее всего, критической прочностью здесь не обойтись, так как темп возведения вышележащих конструкций здания будет превышать возможности данной колонны по прочности. Для примера, панельное

здание в 10 этажей на монолитном стилобате возводится в течение 1-2 месяцев. Т.е. монолитная колонна стилобата уже в декабре-январе должна иметь 100% прочности. Если же мы обеспечили набор только критической прочности бетоном колонны (30-50%), то здание можно будет закончить только в теплый период, со всеми вытекающими экономическими последствиями.

В последнее время наблюдается ситуация, когда заказчики строительства сами назначают величины требуемой прочности бетона, пользуясь вышеописанными неопределенностями стандартов. Обычно они назначают требуемую прочность в 100%. Это обусловлено их опасениями, что бетон после распалубки и замораживании при меньших значениях прочности может недобрать 100% в теплый период. Недобор прочности может быть вызван, например, неправильным уходом за бетоном после распалубки, вследствие чего вода для гидратации может просто вымерзнуть в течение зимнего периода. При этом следует понимать, что работы по бетонированию уже оплачены, акты подписаны, подрядчик уже ушел со строительной площадки, а над бетонируемой конструкцией уже возведены вышележащие конструкции здания. Бремя оплаты устранения недобора прочности бетона в этом случае полностью ложится на заказчика, чего он совершенно не хочет.

Но так ли экономически обосновано назначение заказчиком требуемой прочности в 100%?

Для примера возьмем конструкцию монолитной колонны сечением 400×400 мм и высотой 3000 мм, возводимую из бетона класса В30 (трехсуточная прочность бетона 53%) в фанерной опалубке толщиной 15 мм в г. Челябинске в марте месяце (коэффициент теплопередачи опалубки 6,55 Вт/°С.м^2). Согласно [28] средняя температура в марте для данного региона составляет -7,4 °С, при этом амплитуда колебаний температуры в марте составляет 24,8 °С. Таким образом, расчетная температура наружного воздуха составляет -19,8 °С.

В качестве метода зимнего бетонирования примем самый распространенный метод - электропрогрева, состоящий из трех этапов: набора температуры, изотермической выдержки и остывания до 0 °С. Расчеты времени

выдерживания бетона и прочности, которую он набирает, выполнялись по известной методике [6] и приведены в таблице 2.6.1.

Таблица 2.6.1

Время выдерживания бетона до набора требуемой прочности

Этап	Время твердения, час, до прочности		
	80%	95%	99%
Подъем температуры	5	5	5
Изотермическая выдержка	49	103	166
Остывание	15	15	15
Суммарное время	**69**	**123**	**186**

Учитывая особенности расчета прочности бетона по данной методике, когда твердение бетона описывается экспоненциальной зависимостью, получить значение 100% прочности невозможно. Поэтому предельным значением выбрана прочность 99%.

Из таблицы видно, что для увеличения прочности бетона всего лишь на 15% (с 80 до 95%) требуется увеличить время выдерживания на 78%, а для получения проектной прочности, нужно увеличить время выдерживания в 2,7 раза по сравнению с временем, необходимым для набора прочности 80% от проектной.

Видно, что увеличение времени выдерживания происходит только за счет экзотермического прогрева бетона, что требует дополнительных затрат электроэнергии, амортизации прогревочного оборудования и трудозатрат на температурный контроль. Кроме этого, увеличивается целый ряд дополнительных расходов, связанных с оборачиваемостью опалубки, простоев грузоподъемной техники и т.п.

Нельзя ни сказать и о табл. 5.7 в [27]. Эта таблица произошла из табл. 6 СНиП 3.03.01-87 [24] и имеет существенные отличия от источника. Однако, не все изменения пошли на пользу, оставив разночтения в параметрах прочности бетона к моменту замерзания. Например, значения так называемой «критической прочности» бетона оказались привязаны только к конструкциям, эксплуатирующимся внутри зданий, а значения критической прочности для конструкций, подвергающихся атмосферным воздействиям в процессе эксплуатации, вообще исчезли. Кроме того, бетоны с противоморозными добавками оказались не привязанными к конкретным конструкциям, а

5,5 раз), а значит и темп остывания бетона в них будет разным, что приведет к неправильной оценке его прочности. Более того, на стройплощадке может выполняться термообработка бетона в конструкции, которую невозможно повторить в образце-кубе. В тоже время, в этом же пункте правил справедливо говорилось, что допускается контролировать прочность бетона по его температуре в процессе выдерживания.

В качестве замечания: следовало исключить слово «допускается», заменив его обязательным требованием. Многочисленные исследования показывают, что в зимних условиях именно контроль прочности бетона по его температуре является единственно возможным [25, 16, 20], за исключением небольшого ряда случаев, которые будут рассмотрены ниже.

Также действующий с 01 сентября 2012 года ГОСТ 18105-2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности» предусматривает производить контроль прочности бетона по контрольным образцам (примечание к п. 4.3), изготовленным на строительной площадке и твердевшим в условиях, предусмотренных проектом производства работ или технологическим регламентом на производство монолитных бетонных и железобетонных конструкций данного объекта строительства (п. 5.4) [11]. Но в случае реализации большинства методов зимнего бетонирования выполнить данное требование невозможно.

В СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87» [27], вообще исключены все пункты, касающиеся методов контроля прочности бетона в зимнее время. Оставлены лишь ссылки на национальные стандарты [9, 10 ,12], в которых отсутствует упоминание о контроле прочности бетона по его температуре. По сути, опять говорится о контроле прочности бетона по образцам-кубам [9] и указана возможность осуществления контроля прочности неразрушающими методами. Однако, в п. 1.6 [10] и п. 1.4 [12] сказано, что испытания неразрушающими методами проводят при положительной температуре бетона! При этом допускается проведение испытаний при температуре не ниже минус 10ºС, но при условии, что относительная влажность воздуха при выдерживании

бетона не превышала 70%. Учитывая, что в зимнее время влажность воздуха всегда повышена (например, в Челябинской области относительная влажность воздуха зимой всегда выше 70%), в большинстве случаев применение неразрушающих методов контроля прочности бетона невозможно.

Нужно отметить, что в стандарте Национального объединения строителей СТО НОСТРОЙ 2.6.54-2011 «Конструкции монолитные бетонные и железобетонные. Технические требования к производству работ, правила и методы контроля» [29], вопросы контроля прочности бетона в зимних условиях также недостаточно освещены. Вновь нигде не сказано о необходимости, и даже возможности, контролировать прочность бетона по его температуре.

2.7. Термонапряженное состояние бетона конструкции

Сам по себе контроль прочности бетона не является исчерпывающим при оценке качества бетона. Следует обязательно учитывать и его термонапряженное состояние в процессе выдерживания. На температурные напряжения оказывают влияние следующие основные параметры:

– скорость нагрева и остывания бетона;

– разность температур наружного воздуха и бетона при распалубке;

– перепад температуры по сечению бетона.

Оценка термонапряженного состояния бетона на основе перепада температур по сечению конструкции вообще не рассматривается в существующих нормах. В тоже время, температурные напряжения вызванные перепадом температур по сечению бетона конструкции, могут быть определены по следующей формуле [16]:

$$\sigma = \frac{\alpha \cdot E_b}{1-\upsilon}\left(t_1 - t_2\right)\left(\frac{x^2}{R^2} - \frac{1}{3}\right), \qquad (2.7.1)$$

где υ – коэффициент Пуассона для бетона ($\upsilon = 0{,}2$);

α – коэффициент линейного температурного расширения бетона ($\alpha = 0{,}00001$ 1/ºС);

Из [26]:

$E_a = 17 \cdot 10^4$ МПа ($В_рI$)

$E_a = 18 \cdot 10^4$ МПа ($AIII_в$)

$E_a = 19 \cdot 10^4$ МПа (AIV, AV, AVI, AVII)

$E_a = 20 \cdot 10^4$ МПа (AIII, BII, $В_рII$)

$E_a = 21 \cdot 10^4$ МПа (AI, AII)

Из формулы (2.7.2) определим температуру в центре конструкции:

$$t_ц = \frac{3\sigma(5 \cdot \mu \cdot n + 1)(1 - \upsilon)}{2 \cdot \alpha \cdot E_b} + t_n \quad (2.7.3)$$

В бетонной конструкции будут отсутствовать трещины, если напряжения, вызванные перепадом температур, будут меньше расчетного сопротивления бетона на осевое растяжение. Таким образом, принимая во внимание условие $\frac{\sigma}{R_{bt}} \le 1$, формула (2.7.3) будет выглядеть так:

$$t_ц = \frac{3R_{bt}(5 \cdot \mu \cdot n + 1)(1 - \upsilon)}{2 \cdot \alpha \cdot E_b} + t_n$$

Тогда допустимый перепад температур по сечению бетона конструкции выразим следующим образом:

$$\Delta t = \frac{3R_{bt}(5 \cdot \mu \cdot n + 1)(1 - \upsilon)}{2 \cdot \alpha \cdot E_b}$$

В связи с тем, что в технологии зимнего бетонирования контролируется текущая прочность бетона при сжатии (в процентах), то для получения текущих значений расчетного сопротивления бетона растяжению и его модуля упругости необходимо воспользоваться нормативными соотношениями между классом бетона по прочности на сжатие, R_{bt} и E_b. Для удобства аппроксимируем табличные значения норм [26] в виде функций:

$$R_{bt} = 0{,}190 \cdot \left(\frac{B \cdot R_b}{100\%}\right)^{0{,}637}, [МПа]$$

Заключение

Таким образом, в результате выполнения выпускной квалификационной работы достигнута главная ее цель, а именно разработан математический аппарат, который позволит спрогнозировать температурные параметры выдерживания бетона в зимнее время.

В ходе решения поставленных задач выполнено следующее:

1. Получена формула для определения расчетной температуры наружного воздуха в заданном месяце с учетом максимальной амплитуды колебания суточной температуры;
2. По закону Ньютона получена формула времени остывания бетона, аналогичная полученной ранее графоаналитическим методом;
3. Из теоремы Кондратьева выведена формула для определения коэффициента теплопередачи ограждения бетона, обеспечивающая заданный градиент температур;
4. Получена формула для определения минимально необходимого количества контрольных температурных точек в зависимости от времени укладки бетона в конструкцию, толщины плитной конструкции и температуры наружного воздуха;
5. С помощью правила Вант-Гоффа и уравнения Аррениуса проведена оценка зависимости роста прочности бетона от температуры.
6. На основе уравнения Красновского получен допустимый перепад температур по сечению бетона конструкции;
7. Построены графики для определения максимально допустимого перепада температур по сечению бетона конструкции в зависимости от параметров армирования и текущей прочности бетона.

Библиографический список

1. Абрамов, В.С. Электротермообработка бетона / В.С. Абрамов, Н.Н. Данилов, Б.М. Красновский. – М.: МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1975. – 168 с.
2. Белоусова, Н. В. Химическая кинетика [Электронный ресурс] электрон. учеб. пособие / Н.В. Белоусова, О.В. Белоусов. – Электрон. дан. (2 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2009.
3. Бессер Я.Р. Методы зимнего бетонирования / Я.Р. Бессер. – М.: Стройиздат, 1976. – 168 с.
4. Гныря, А.И. Технология бетонных работ в зимних условиях / А.И. Гныря. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1984. – 280 с.
5. Головнев, С.Г. Компьютерный контроль и регулирование процессов выдерживания бетона в зимних условиях / С.Г. Головнев, Г.А. Пикус, К.М. Мозгалев, С.А. Савинов // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2010. – Вып. 2 – с. 75 – 78.
6. Головнев, С.Г. Оптимизация методов зимнего бетонирования / С.Г. Головнев, – Л.: Стройиздат, 1983. – 235 с.
7. Головнев, С.Г. Технология зимнего бетонирования. Оптимизация параметров и выбор методов / С.Г. Головнев. Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1999. – 156 с.
8. ГСН 81-05-02-2001 Сборник сметных норм дополнительных затрат при производстве строительно-монтажных работ в зимнее время
9. ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – М. Стандартинформ, 2006. – 31 с.
10. ГОСТ 17624-87. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.
11. ГОСТ 18105-2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. -– М. Стандартинформ, 2012. – 16 с.
12. ГОСТ 22690-88. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля.
13. ЕНиР. Общая часть / Госстрой СССР. – М. Прейскурантиздат, 1987. – 38 с.

14. Колчеданцев, Л.М. Интенсифицированная технология бетонирования среднемассивных конструкций / Л.М. Колчеданцев // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 1998. – № 4. – С. 7 – 11.

15. Колчеданцев, Л.М. Способ интенсификации бетонных работ и средство управлением структурообразованием бетона / Л.М. Колчеданцев // Строительные материалы. – 1998. – № 2. – С. 14 – 16.

16. Красновский, Б.М. Инженерно-физические основы методов зимнего бетонирования / Б.М. Красновский. – М.: Изд-во ГАСИС, 2007. – 512 с.

17. Миронов, С.А. Теория и методы зимнего бетонирования / С.А. Миронов. – М.: Стройиздат, 197. – 700 с.

18. Молодин, В.В. Технология зимнего бетонирования строительных конструкций с управлением термообработкой бетона путем моделирования температурных режимов. автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.23.08 / Молодин Владимир Викторович. – Новосибирск, 2012. – 36 с.

19. Пикус, Г.А. Нормативные требования к контролю прочности бетона, выдерживаемого в зимних условиях / Г.А. Пикус, К.М. Мозгалев // Справочник руководителя строительной организации, №1, 2014. С.18-21.

20. Пикус, Г.А. Оценка необходимого количества контрольных температурных точек при выдерживании монолитных плитных конструкций в зимнее время / Г.А. Пикус, К.М. Мозгалёв // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2014. – №3. – С.70–71.

21. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / под редакцией Б.А. Крылова, С.А. Амбарцумяна, А.И. Звездова. – М.: РААСН, НИИЖБ, 2005. – 275 с.

22. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера. – М.: ЦНИИОМТП Госстроя СССР Стройиздат, 1982. – 313 с.

23. СНиП III-15-76 «Бетонные и железобетонные конструкции монолитные». – М.: ЦНИИОМТП Госстроя СССР Стройиздат, 1977. – 126 с.

24. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции. – М.: ЦНИИОМТП Госстроя СССР Стройиздат, 1987. – 192 с.

25. Современные строительные технологии: монография / под ред. С.Г. Головнева. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 268 с.

26. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Аналитик, 2012. – 160 с.

27. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87. – М.: Минрегион России, 2012.

28. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. – М.: Минрегион России, 2012.

29. СТО НОСТРОЙ 2.6.54-2011. Конструкции монолитные бетонные и железобетонные. Технические требования к производству работ, правила и методы контроля.

30. Урочное положение для строительных работ. – С.Петербург: Типография правительствующего сената, 1895. – 366 с.

31. http://www1.fips.ru/.