

6. Пимшин Ю.И., Науменко Г.А., Корженевская И.В. Контроль вертикальности инженерных объектов // Инженерный вестник Дона, 2016, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3566
7. Михайлов В. И., Кононович С. И., Чиберкус Ю. Н. Экспериментальные измерения уклона башен электронным тахеометром // Наука и техника. - 2015. - №2. - С. 42-47.
7. Овчинников И.Г., Почтман М.Ю. Тонкостенные конструкции в условиях коррозионного износа. Расчет и оптимизация (монография). Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1995.192 с.
8. Наумова Г.А., Овчинников И.Г. Расчеты на прочность сложных стержневых и трубопроводных конструкций с учетом коррозионных повреждений (монография). СГТУ. Саратов.2000. 227 с.
9. Наумова Г.А., Овчинников И. Г., Снарский С.В. Расчет трубопроводных конструкций с эксплуатационными повреждениями. Волгоград. Научное издание. ВолгГАСУ, 2009. 184 с.
10. Чернявский В.Л., Хаютин Ю.Г., Аксельрод Е.З., Клевцов Н.В., Фаткуллин Н.В. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. М. 2006. 60 с.
11. Бокарев С.А., Иванов А.А., Смердов Д.Н., Яшнов А.Н., Жильцов П.Д., Максименков П.Е. Инновационные методы усиления конструкций мостов. СибГУПС и ООО Главгросстрой. Новосибирск. 2008. 38 с.
12. ТУ 1916-005-61664530-2011. Углеродные однонаправленные ленты для систем внешнего армирования (СВА). Технические условия. ЗАО «Препрег-СКМ».М. 2011. 24 с.

© Т. В. Золина, В. Д. Башмачников

Ссылка для цитирования:

Т. В. Золина, В. Д. Башмачников. Основные проблемы определения пространственных форм башен в стесненных условиях и методика выравнивания конструкций с последующим их усилением // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2020. № 2 (32). С. 16–21.

УДК 693.5; 519.62

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ УСКОРЕННОГО ТВЕРДЕНИЯ
МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ВОЗВОДИМЫХ В УСЛОВИЯХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР**

Е. М. Дербасова, Е. М. Бялецкая, М. В. Вереин, Р. М. Дуафи

Астраханский государственный архитектурно-строительный университет, г. Астрахань, Россия

Содержание статьи касается вопросов ускоренного твердения монолитных конструкций в зимний период с применением инфракрасного нагрева. Поставлена задача по оптимальному температурному распределению по толщине изделия с целью достижения требуемых характеристик прочности конструкции, учитывая ее громоздкости, времени прогрева и трудозатрат. Процесс интенсификации реализуется при переменных климатических параметрах окружающей среды, что накладывает определенные трудности на технологию сооружения строительных объектов. Представлены результаты численных решений процесса ускоренного твердения с использованием программного обеспечения MathLab, изменение температурных полей было получено по толщине продукта при различных начальных и предельных условиях, плотности теплового потока с учетом внутренних тепловыделений бетонной смеси, возникающих в результате экзотермического воздействия цемента, и параметров окружающей среды. в течение которого проводится ускоренное отверждение. Результаты исследований представлены в виде критериального уравнения, которое имеет большое практическое значение и позволяет определить оптимальные технологические режимы ускоренного упрочнения монолитных конструкций.

Ключевые слова: монолитное строительство, температура, инфракрасный нагрев, бетонирование, опалубка, моделирование, теплообмен, интенсификация, прочность.

**RESEARCH OF TEMPERATURE CONDITIONS OF ACCELERATED HARDENING
OF MONOLITHIC STRUCTURES BUILT UNDER NEGATIVE TEMPERATURE CONDITIONS**

E. M. Derbasova, E. M. Bialeckaya, M. V. Verein, R. M. Duafi

Astrakhan State University of Architecture and Civil Engineering, Astrakhan, Russia

The article is devoted to the issues of accelerated hardening of monolithic structures in the winter using infrared heating. The task is to optimally distribute temperatures over the thickness of the product to achieve the required strength characteristics of the structure, taking into account its massiveness, warm-up time, and labor costs. The intensification process is carried out with variable climatic parameters of the environment, which imposes certain difficulties on the technology of construction projects. The results of numerical solutions of the accelerated hardening process using the MathLab software are presented, the change in temperature fields is obtained over the thickness of the product under various initial and boundary conditions, heat flux density, taking into account the internal heat generation of the concrete mixture arising as a result of cement's heat of hardening and environmental parameters, during which the process of accelerated hardening is carried out. The research results are presented in the form of a criterion equation that has high practical value and allowing to determine optimal technological modes of accelerated hardening of monolithic structures.

Keywords: monolithic construction, temperature, infrared heating, concreting, formwork, modeling, heat exchange, intensification, strength.

Введение

В области современного строительства, одним из ключевых векторов развития является применение технологий и методов монолитного бетонирования при возведении зданий промышленного и гражданского назначения [12], наряду с этим, создание подобных строитель-

ных объектов неизбежно может приводить к необходимости возведения и последующей модификации новых современных и более эффективных архитектурных и строительных систем, технологий для их реализации. За последние полтора десятка лет имели место революционные изменения в методах и способах строитель-

ства железобетонных высотных зданий, причем, коснулись они способа укладки, утепления наружных конструкций, а также технологий производства и твердения бетона.

Благодаря современным научным исследованиям ученых и многолетнему опыту и знаниям в производстве, вопреки существенным недостаткам технологий монолитного строительства, а именно, возникающим трудностям работы при возведении объектов при низких температурах, такая «зимняя» работа выполняется круглый год [1, 11].

Существенное влияние на технологию строительных работ в холодный зимний период года оказывают климатические характеристики России, существующие в силу ее географического положения. Длительность зимнего периода для климатических условий центральной России составляет около 5–6 месяцев [2]. В силу чего, использование лишь одного короткого летнего сезона для строительства сооружений было бы неразумным и ненужным [1].

В настоящее время, значительное количество методов и способов зимнего бетонирования находят применение в отечественной и зарубежной практиках строительства и подобное их разнообразие требует строгой классификации. Рядом авторов и специалистов выделяются две основные группы методов: электротермическая обработка и методы беспрогревной обработки [3, 4].

Предварительный нагрев свежесложенной бетонной смеси является одним из наиболее эффективных способов бетонирования строительных конструкций в зимний период. Как бы то ни было, обозначенный метод является труднореализуемым технически. Способы нагрева за счет нагревательных проводов и электродов обладают не только значимыми преимуществами, но и имеют свои недостатки. В современных реалиях комбинированный метод более распространен при выборе вариантов термообработки бетонных элементов, и может использоваться для различных конструктивных систем и условий внешней среды. Так, например, это может быть укладка греющего провода в колонны, перекрытия, конвективный обогрев замкнутых объемов. Также, уже имеют место разработки по термообработке бетона в щитовой опалубке, оборудованной греющей системой (термоопалубка) [5].

Процесс термообработки бетона с использованием греющей опалубки и системы с ИК-излучателями является одним из наиболее передовых и эффективных решений, однако, стоит отметить, что в зимний период, при отрицательных температурах, приготовление бетонной смеси имеет свои особенности. Помимо обеспечения условий предотвращения трещинообразования, требуется строго соблюдать

условие набора прочности. Оно требует, чтобы бетон не замерз до момента, пока не наберет определенную прочность (порядка 40–50 % от необходимой), и именно для этого необходимо, чтобы в течение всего периода твердения смесь имела положительную температуру.

Температура составляющих бетонной смеси при приготовлении, в свою очередь, и определяет ее температуру. Заполнители, как правило, хранятся на открытом воздухе (зимой также следует учитывать промерзание), вследствие чего требуется их подогрев. Величина подъема температуры определяется расчетом в зависимости от необходимой температуры на выходе [6].

При ускоренном твердении монолитных конструкций в зимний период необходимо добиться оптимального распределения температур в конструкции при минимальных затратах и времени, с учетом требований размеров самой конструкции, ее громоздкости, способа укладки и температуры окружающей среды, времени, необходимого для набора прочности, а также таких показателей, как трудозатраты, сроки производства работ, затраты на оборудование и материалы.

Приемлемый метод ускорения твердения бетона в монолитных конструкциях должен отвечать критерию энергоэффективности. Расход топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в строительном производстве зависит от нескольких факторов, но ключевое значение отводится толщине конструкции и погодным условиям (температурный фактор). ТЭР, затрачиваемые на работу машин и оборудования, необходимого для создания температурно-влажностного режима, в местах производства составляют не менее 30 % в общей структуре расхода ТЭР на технологические нужды. При проведении монолитных работ в зимнее время энергоресурсы используются для следующих целей:

- отогрев ранее уложенного слоя или грунта основания;
- нагрев опалубки;
- нагрев смеси;
- нагрев арматурного каркаса;
- испарение влаги при росте температуры и изотермическом прогреве;
- компенсация потерь теплоты.

Таким образом, необходимость решения задач, связанных с особенностями твердения монолитных бетонных конструкций под действием установок инфракрасного излучения при различных климатических параметрах окружающей среды, недопустимость загрязнения воздуха и превышения ПДК вредных веществ, а также разработка математической модели, помогающей оптимизировать процесс ускоренного твердения бетона в монолитных конструкциях определяют актуальность исследования авторов.

Реализация процесса интенсификации твердения монолитных бетонных конструкций на строительной площадке позволит снизить длительность возведения и минимизировать риски недобора проектной прочности, обеспечив надежную эксплуатацию в дальнейшем [7].

Основная часть

Один из способов поддержания заданной температуры бетона состоит в том, чтобы подвергать его воздействию инфракрасного излучения, которое имеет тенденцию поглощаться телом и превращаться в тепловую энергию.

Метод является безопасным не только по отношению к человеку, но и применительно к экологии в целом. Применительно к масштабам строительного производства испускаемая тепловая радиация не может значительно повысить температуру окружающей среды и ухудшить климатическую ситуацию. Для того чтобы избежать падения прочности бетонных конструкций и обеспечить необходимые температурно-влажностные условия, следует реализовать в процессе строительства специальные способы приготовления, укладки и выдерживания бетонной смеси.

Процесс нагрева тонких поверхностных слоев бетона объясняется превращением лучистой энергии в тепловую. Остальная часть бетонной конструкции прогревается за счет экзотермии цемента и теплопередачи от поверхностных слоев, включающих первую треть элемента.

В качестве источника инфракрасного излучения на практике чаще всего используются ТЭНы, мощность которых должна быть подобрана исходя из условий, реализованных на строительной площадке (стандартная мощность составляет не более 1,2 кВт при напряжении 220 или 380 В).

Стоит отметить, что особенность указанного метода заключается в том, что, бетон нагревается с помощью металлических или трубчатых электронагревательных элементов с одной или обеих сторон, в то время как инфракрасные лучи, проходящие через воздух, передают лучистую энергию в виде непосредственно облучаемой тепловой поверхности бетона, вследствие чего возникает неравномерность температурного поля по толщине изделия. Это может привести к резкому ухудшению качественных характеристик готовой продукции.

Кроме того, процесс является непрерывным, с изменяющимися климатическими параметрами окружающей среды. (от $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$), что требует увеличения или уменьшения мощности нагрева. Плотные сроки строительства накладывают дополнительные ограничения на режимы бетонирования. Анализ этих проблем, решение которых в литературе отсутствует, позволил сформулировать основные направления исследований, среди которых разработка

методов расчета и технологии ускоренного твердения монолитных конструкций с использованием инфракрасного нагрева при отрицательных температурах окружающей среды.

Использование инфракрасного излучения с последующим его преобразованием в тепловую энергию является оптимальным решением по ряду критериев. Оборудование для реализации данного метода на практике может функционировать от сети переменного тока без использования дополнительных преобразователей, необходимых при выборе электродов в качестве источника тепла. В случае использования инфракрасного излучения у рабочих есть возможность регулировать его мощность на месте с учетом толщины бетонных изделий, что обеспечивает оптимальный контроль над процессом.

В связи с вышеуказанным, необходимо выполнить поиск оптимальных параметров твердения монолитного бетона, оптимизировать нестационарный тепловой режим работы системы обогрева изготавливаемых элементов с учетом климатических и технологических особенностей.

Так как для инфракрасного способа интенсификации процесса твердения используется коротковолновая область спектра с длиной волны от 780 нм до 1 мм, толщина отливаемого слоя бетона не должна превышать 500 мм. В случае обогрева конструкции с одной стороны, оптимальный температурный градиент создается при толщине слоя в 200–350 мм, при этом температура прогрева не должна превышать $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальная скорость подъема температуры верхней облучаемой поверхности бетона составляет $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Стандартная толщина наружной стены монолитного здания составляет до 450 мм, поэтому использование ИК-лучей оправдано.

Воздействие инфракрасного излучения в целях ускорения твердения бетона в монолитных конструкциях может быть осуществлено посредством проволочных нагревателей, которые следует вводить в предусмотренные конструкцией железобетонных изделий пустоты. В таком случае рабочим приходится регулировать температуру периодическим включением и выключением нагревателей.

Учет климатических параметров наружной среды необходим при задании теплового потока. В процессе применения инфракрасного обогрева конструкций, возводимых в скользящей опалубке, скорость разогрева должна соответствовать скорости, с которой она поднимается, однако важно не превышать лимиты подъема температуры облучаемых поверхностей бетонных конструкций.

Использование инфракрасного излучения в качестве способа ускорения твердения бетона в монолитных конструкциях требует соблюдения особой технологии подготовки смеси. На первом

этапе ее следует предварительно выдерживать перед прогревом в течение 3–4 часов.

Длительность подъема температуры напрямую зависит от толщины конструкции: если она составляет менее 150 мм, необходимо ограничиться 30–40 минутами; при толщине 200 мм и более минимальным значением является 40 минут. Прочность прогретых изделий растет с течением времени, причем интенсивность возрастания тем выше, чем больше общая подвижность смеси и меньше показатель начальной прочности бетона.

Для расчета процессов теплопереноса в слоях твердеющего бетона, необходимо проанализировать модель монолитной конструкции, набор прочности которой искусственно ускоряется под действием инфракрасного излучения. Изменение температуры тела $t(x, y, z)$ фиксируется в период $\Delta t = (0, \tau)$. Исходное уравнение твердения в общем случае выглядит так:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = a \nabla^2 + q_{\tau}(x, \tau), \quad (1)$$

где $a = \frac{\lambda}{(c \cdot \rho)}$ – коэффициент температуропроводности;

λ – коэффициент теплопроводности;

c – коэффициент объемной теплоемкости;

ρ – плотность;

q_{τ} – внутренние тепловыделения бетона.

При работе с уравнением принят ряд допущений:

- в случае большой величины лучистого потока появление в смеси концентрации компонентов незначительно и может не учитываться при изучении нестационарного поля температуры;
- физические свойства бетонного элемента не меняются в любом направлении;
- в рамках времени, которое необходимо для схватывания раствора, внутреннее тепловыделение в конструкции принято квазипостоянным;
- потери тепла через изоляцию существенно меньше потерь через толщу бетона.

Для запуска математической модели и поиска решения необходимо установить начальные условия, которые свидетельствуют о характере распределения температуры монолитного изделия в начальный момент времени, а также задать граничные условия, описывающие теплообмен по всем плоскостям конструкции.

Начальные условия: $t_0 = t$.

С целью анализа процессов, происходящих на поверхности изделия, необходимо учесть технологический цикл и применить граничные условия для только что отлитого слоя. При проектировании расчетной модели необходимо учесть некоторые особенности монолитной технологии.

В процессе бетонирования каждый следующий слой должен укладываться до начала схватывания предыдущего во избежание появления рабочих швов по высоте конструкции, которые являются ослабленным местом конструкций. Они

представляют собой плоскость стыка между затвердевшим и новым слоями монолитного железобетона, образующиеся из-за перерывов в бетонировании (7 и более часов).

Граничные условия для забетонированного слоя при действии ИК-установок записываются в виде: $-\lambda \frac{\partial t(H, \tau)}{\partial x} = Q$ и в период отключения излучателей при переносе опалубки: $-\lambda \frac{\partial t(H, \tau)}{\partial x} = 0$.

Рассматриваемая задача требует анализа двумерной теплопроводности и решения дифференциального уравнения в частных производных второго порядка, описывающего распределение температуры в набирающей прочность конструкции [1]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) + \frac{q}{\rho c}. \quad (2)$$

Задача решается при помощи метода конечных разностей при использовании неявной схемы (рис. 1, 2).

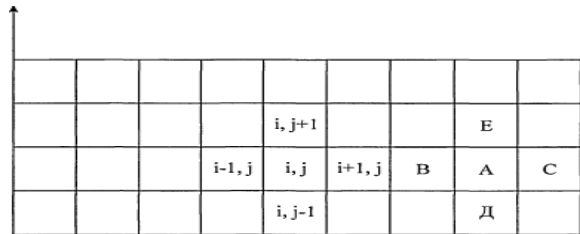


Рис. 1. Явная схема узловых точек при использовании конечно-разностного метода

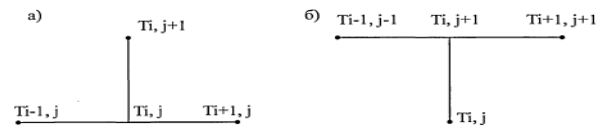


Рис. 2. Схемы узловых точек при конечно-разностной аппроксимации производной температуры по времени (а – явная; б – неявная)

При выборе численного метода для получения комплекса данных необходимо найти температуры для $t_{i-1, j}$; $t_{i, j}$; $t_{i+1, j}$ для любого i . Численное решение включает не только полученные значения, но и число расчетных точек. Для решения дискретных уравнений при рассмотрении расчетной области необходимо найти тепловой баланс в элементарной ячейке (контрольном объеме). Найденное в итоге решение применимо к расчетной области в целом.

Уравнение для данного случая записывается в виде:

$$t_{i, j(\tau + \Delta \tau)} = t_{i, j(\tau)} + q \frac{\Delta \tau}{\rho c} + \alpha \frac{\Delta \tau}{\Delta x^2} [t_{i-1, j(\tau)} - 2t_{i, j(\tau)} + t_{i+1, j(\tau)}] + \frac{\Delta x^2}{\Delta y^2} \cdot [t_{i, j-1(\tau)} - 2t_{i, j(\tau)} + t_{i, j+1(\tau)}], \quad (3)$$

где i и j – координаты (номера) узловой точки по оси X и оси Y ;

Δx и Δy – шаг сетки по осям X и Y ;

Δy – шаг сетки по осям X и Y , м;

Δt – шаг по времени, с.

Конечно-разностное уравнение теплопроводности в одномерной системе выглядит следующим образом:

$$t_{i(\tau+\Delta\tau)} = t_{i(\tau)} + q \frac{\Delta\tau}{\rho c} + a \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \cdot [t_{i-1(\tau)} - 2t_{i(\tau)} + 2t_{i+1(\tau)}]. \quad (4)$$

Для создания математической модели ускоренного твердения монолитных конструкций в условиях строительного производства используется ПО MathLab. Интерактивная среда позволяет проводить численные расчеты и визуализировать результаты быстрее, чем это выполняется с помощью C/C++ или Java.

Результаты численных решений процесса ускоренного твердения и их анализ

Численные решения процесса ускоренного твердения бетона находились постановкой задачи для забетонированного слоя при действии ИК-установок с одной и двух сторон. Начальные условия, определяющие картину температурного поля в толще и на границах монолитного элемента в начальный момент времени, зависят от допустимого диапазона их изменения, который связан с требованиями по качеству.

В проводимом авторами эксперименте приняты следующие основные параметры: исходная температура бетона составила 27 °С; максимальная температура нагрева: 80 °С ≤ t_{max} ≤ 90 °С; граничными условиями учитывается температура окружающей среды и температурное поле на поверхности опалубки; мощность нагрева принята в пределах 800–1200 Вт с шагом 200 Вт; толщина слоя бетонных монолитных конструкций – 200, 350 и 400 мм; время ускоренного твердения – 6–12 ч с шагом 1 ч. Процесс численного моделирования ускоренного твердения осуществлялся при помощи программного комплекса MathLab.

На рисунках 3–5 представлена характеристика температурного поля монолитных конструкций при обработке ИК-лучами при различных параметрах толщины элементов, мощности теплового потока, температуры воздуха и длительность прогрева. Рассматривается как технология прогрева с одной стороны, так и при двустороннем воздействии лучей.

К примеру, на рисунке 3 показано распределение поля при температуре воздуха 0 °С и плотности теплового потока 1000 Вт/м² для монолитной стены толщиной 200 мм. ИК-установки работают в течение 9 часов, что позволяет слою, который находится ближе всего к источнику излучения, прогреться до температуры чуть выше 85 °С.

Более удаленные слои прогреваются к моменту окончания действия излучателей на величину в пределах 67–80 °С. При работе нагревателей лучистая энергия преобразуется в тепловую в опалубке и поверхностном слое бетона, остальной объем конструкции нагревается благодаря теплопроводности от наружных слоев. По окончании действия установок происходит

остывание элементов, что приводит к более равномерной картине температурного поля с постепенным уменьшением градиента.

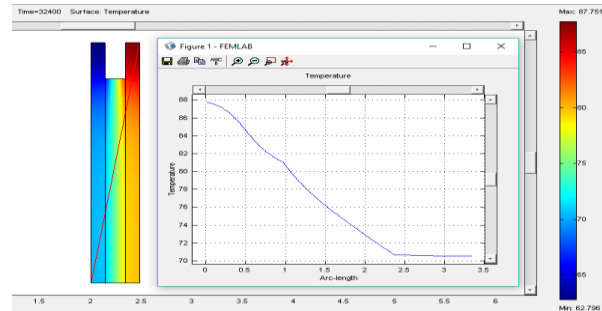


Рис. 3. Изменение температурного поля в процессе твердения монолитной стены (200 мм)
Режимные параметры: $\tau = 9$ часов, $t_{\text{окр.ср.}} = 0$ °С, $q = 1000$ Вт/м²

При выборе оптимальных режимов твердения важно, чтобы температура слоя, расположенного ближе всего к источнику излучения, находилась в пределах 80–90 °С, поскольку превышение значения ведет к деформациям и несоответствию физико-механическим показателям, установленным документально для той или иной конструкции.

Двустороннее воздействие инфракрасных лучей оправдано для элементов толщиной 350–500 мм. Так, в случае использования стены толщиной 350 мм при температуре воздуха 0 °С и мощности теплового потока 800 Вт/м² установки ИК-излучения работали в течение 10 часов (рис. 4). В результате ближайшие к источнику тепла слои достигли температуры 88,6 °С. При этом слой в середине конструкции прогрелся до 77,7 °С.

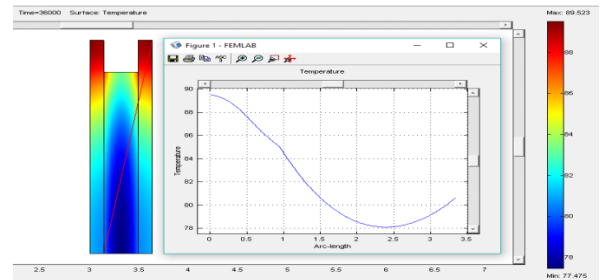


Рис. 4. Изменение температурного поля в процессе твердения монолитной стены (350 мм) при двустороннем обогреве
Режимные параметры: $\tau = 10$ часов, $t_{\text{окр.ср.}} = 0$ °С, $q = 800$ Вт/м²

В случае использования установок для прогрева монолитных колонн сечением 400×400 рекомендовано двустороннее действие лучей. Это позволяет достигнуть температуры всех слоев в оптимальном диапазоне. В качестве примера можно рассмотреть случай, когда температура воздуха составила 10 °С, мощность теплового потока была установлена 1000 Вт/м² (рис. 5). Время действия установок – 8 часов. Поверхностные слои прогрелись до 89,8 °С, слои в середине конструкции – 79 °С.

На практике установлено, что при остывании вертикальные монолитные конструкции нахо-

дятся в сложном напряженном состоянии. Оно меняется с течением времени, находится в зависимости от нескольких факторов: распределение температур по сечению и плоскости, степень армирования, распалубочная прочность бетона.

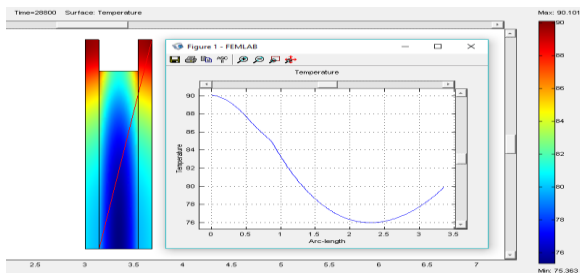


Рис. 5. Изменение температурного поля в процессе твердения монолитной колонны (400 мм) при двустороннем обогреве
Режимные параметры: $\tau = 8$ часов, $t_{\text{окр.ср.}} = 10$ °С, $q = 1000$ Вт/м²

При задании оптимальных температурных режимов, определенных благодаря математическому моделированию для различных условий, есть возможность корректирования напряженно-деформированного состояния для повышения трещиностойкости конструкций. На стадии прогрева внутренняя температура постепенно повышается, в этот период осуществляется процесс испарения влаги, а прогрев нижних слоев бетонной смеси реализован за счет теплопроводности и внутренних тепловыделений бетонной смеси. Возможное появление трещин в монолитных конструкциях связано с тем, что бетон к моменту распалубки не имеет достаточной прочности. Следовательно, напряжения, которые возникли из-за температурной обработки, превышают прочность бетона при растяжении.

Для систематизации и обобщения полученных результатов, а также их дальнейшего практического использования в виде обобщающей зависимости использовалась классическая теория подобия. Подход к уравнениям, описывающим нестационарную теплопроводность, предполагает использование критериев подобия Фурье (Fo) и Био (Bi) [8, 9]. С этой целью, обработка полученных данных осуществлялась в безразмерном виде с использованием указанной теории подобия в виде зависимости $Bi_i = f(Fo, t)$.

Разница решаемой задачи с традиционным подходом заключается в том, что главная цель – определить мощность ИК-установок и время их работы для получения температурного поля в диапазоне, который установлен согласно технологии, а не просто найти картину температурного поля объекта [10]. По этой причине необходимо модифицировать вид обобщающих критериев подобия:

Био:

$$Bi = \frac{q \cdot l}{\Delta t \cdot \lambda}, \quad (5)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²;

l – характерный размер тела, м;

$\Delta t = t_{\text{опт.бет.}} - t_{\text{нач.бет.}}$ – разность между оптимальной температурой твердеющего бетона (90 °С) и начальной температурой, с которой производится укладка бетона в опалубку и осуществляется его твердение (27 °С).

Фурье:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2}, \quad (6)$$

где $a = \frac{\lambda}{(c \cdot p) }$ – коэффициент температуропроводности, м²/с;

τ – характерное время изменения внешних условий, с.

Безразмерная температура:

$$\theta = \frac{t_{\text{max.бет.}} - t_{\text{окр.ср.}}}{t_{\text{нач.бет.}} - t_{\text{окр.ср.}}}, \quad (7)$$

где $t_{\text{max.бет.}}$ – максимальная температура подвергаемого тепловой обработке бетона, °С;

$t_{\text{нач.бет.}}$ – начальная температура, с которой производится укладка бетона в опалубку, °С;

$t_{\text{окр.ср.}}$ – температура окружающей среды, при которой осуществляется твердение бетона, °С.

Результаты математического моделирования ускоренного твердения монолитных конструкций под действием ИК-установок свидетельствуют, что при увеличении толщины элементов в случае сохранения значений времени твердения и параметров окружающей среды число Фурье уменьшается. Это связано с изменением скорости перестройки поля температуры внутри конструкции.

Обратная ситуация зафиксирована при анализе изменений критерия Био: с ростом толщины монолитного слоя увеличивается модуль критерия, при снижении плотности теплового потока наблюдается его уменьшение.

Безразмерная температура главным образом зависит от двух показателей – максимальной температуры, зафиксированной у элемента, который набирает прочность, а также температуры воздуха. С ростом значения, характерного для укладки бетона в опалубку, увеличивается модуль показателя в целом.

Графическое отображение итогов моделирования стены толщиной 200 мм представлено на рисунке 6 – зависимость безразмерной температуры при изменениях критерия Фурье, объяснимых разным периодом прогрева.

Практические рекомендации полученных данных определяют представление результатов в виде критериального уравнения.

Для расчёта технологических режимов ускоренного твердения монолитных конструкций на строительных площадках, в безразмерном виде

получено уравнение, которое имеет следующий вид:

$$Bi = \frac{0,165}{4 + 0,32 \cdot \theta} \cdot Fo^{-1,12} \cdot \theta^{\frac{9+3,1 \cdot Fo}{5+0,5 \cdot \theta}} \quad (8)$$

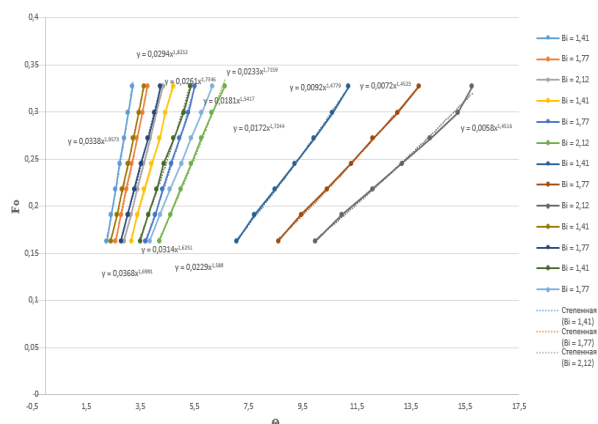


Рис. 6. Обработка результатов, полученных для монолитной стены толщиной 200 мм, в безразмерном виде

По результатам создания математической модели ускоренного твердения бетона под действием ИК-установок получено изменение температурных полей по толщине бетонного изделия при различных начальных и граничных условиях, плотности теплового потока, при учете источника внутренних тепловыделений бетонной смеси, возникающих вследствие экзотермии цемента и параметров окружающей внешней среды, при которых осуществляется процесс ускоренного твердения строительных элементов.

Факторы, которые влияют на интенсивность твердения, отражаются также на тепловыделении бетона. Ключевая роль в данном вопросе отводится минералогическому составу цемента. Положительная сторона экзотермии –

ускорение возведения конструкций при зимнем бетонировании и меньшие затраты энергии при тепловой обработке.

Результаты

Задача математического моделирования процесса теплопереноса, протекающего в слоях бетона, подвергаемого тепловой обработке с использованием инфракрасного нагрева, является сложной и актуальной. На основе анализа существующих в настоящее время методов исследований для решения поставленной перед авторами задачи, был выбран метод численного моделирования, как позволяющий обеспечить исследование процессов твердения в широком диапазоне определяющих параметров. Традиционный подход в решении поставленной задачи базируется на получении температурного поля по толщине отливаемой бетонной конструкции при ее искусственном прогреве, однако, определение условий однозначности (толщина слоя отливаемого бетона и мощность ИК-нагревателей) видится более эффективным решением для получения температурного поля в заданном технологическом диапазоне. В связи с этим, были предложены модифицированные значения обобщающих критериев подобия.

Полученное в безразмерном виде критериальное уравнение, имеет высокую практическую ценность и позволяет определять оптимальные технологические режимы для технологии ускоренного твердения монолитных конструкций.

Список литературы

1. Подгорнов, Н.И. Методы термообработки сборного и монолитного железобетона с использованием солнечной энергии [Текст]: дис...д. техн. Наук / Н.И. Подгорнов. – Москва, 2005. – 455 с.
2. Гендин, В.Я. Расчет влагопотерь бетонов при электротермообработке [Текст] / В.Я. Гендин // Бетон и железобетон. – №1. – 1989.
3. Искусственный прогрев бетона [Электронный ресурс]. URL: <http://www.studfiles.ru/preview/551250/> (Дата обращения: 08.04.2019).
4. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера. – Москва: Стройиздат, – 1982 г.
5. Крылов, Б.А., Ли, А.И. Форсированный электроразогрев бетона [Текст] / Б.А. Крыло, А.И. Ли – М.: Стройиздат, 1975. – 156 с.
6. Технологическая карта на выдерживание бетона методом "термоса" и использование разогретых бетонных смесей. М.: ОАО ПКТИпромстрой, 1998.
7. Арбенев, А.С. Технология бетонирования с электроразогревом смеси. [Текст] / А.С. Арбенев, – М.: Стройиздат, 1975. – 107 с.
8. Лыков, А.В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков, – М.: Высшая школа, 1967. – 325 с.
9. Лыков, А.В. Тепломассообмен [Текст]: Справочник / А.В. Лыков, – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
10. Дербасова, Е.М. Технология непрерывного изготовления железобетонных корпусов морских ледостойких платформ в условиях Каспийского моря на основе моделирования тепловых режимов отливки: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 05.08.04 / Дербасова Евгения Михайловна; [Место защиты: Астрахан. гос. техн. ун-т]. - Астрахань, 2015. - 20 с.
11. Metin, Husem The effects of low temperature curing on the compressive strength of ordinary and high performance concrete / Construction and Building Materials / Gozutok, Serhat, 2005. С. 48-53.
12. Wu, Jilan Survey on application and research of high strength concrete and high performance concrete in China / Wu Jilan, Feng Enjie, Ma Yigang, Zhang Renshui / Вестник КузГТУ, 2003. С. 106-108.

© Е. М. Дербасова, Е. М. Бялецкая, М. В. Вереин, Р. М. Дуафи

Ссылка для цитирования:

Е. М. Дербасова, Е. М. Бялецкая, М. В. Вереин, Р. М. Дуафи. Исследование температурных режимов ускоренного твердения монолитных конструкций, возводимых в условиях отрицательных температур // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2020. № 1 (31). С. 21–27