

К ВОПРОСУ О МАКСИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ОСНОВАНИЯ, ПРИ КОТОРОЙ ДОПУСКАЕТСЯ УКЛАДКА БЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

ABOUT MAXIMAL TEMPERATURE OF BEDDING FOR CONCRETE PLACEMENT DURING ERECTION OF TRANSPORT CONSTRUCTIONS

И.С. Пуляев, С.М. Пуляев

I.S. Pulyaev, S.M. Pulyaev

МГСУ

Статья посвящена актуальному в условиях ускоренных темпов строительства вопросу определения допустимой температуры основания, при которой разрешается укладывать бетонную смесь с условием обеспечения высоких потребительских свойств.

The matter of acceptable temperature of basement that allows pour providing required consumer properties during construction at a brisk pace is examined in this article.

В последние годы в строительной индустрии произошло значительное сокращение выпуска сборных железобетонных конструкций ввиду многократного увеличения объёмов применения монолитного бетона. Его использование идёт в комплексе с применением современных технологий, позволяющих в кратчайшие сроки возводить различные сооружения практически любой архитектурной формы и размеров. При этом зачастую для возводимых объектов одним из условий контрактов с фирмами-заказчиками является сокращение сроков строительства сооружений при обеспечении неизменно высокого качества работ, что приводит к необходимости поиска возможных методов интенсификации сложного процесса бетонирования, как, например, при строительстве вантового моста через реку Оку на обходе города Муром, где наряду с необходимостью обеспечения высоких потребительских свойств конструкции возникла потребность создания технологий, обеспечивающих ускоренное возведение монолитных пилонов данного сооружения. Поэтому авторам потребовалось решать проблему сокращения сроков выдерживания бетона в опалубке на примере рассматриваемого объекта.

С конструктивной точки зрения пилон, общий вид одного из которых показан на рисунке 1, состоит из нижней объёмной части и верхней части, которая делится на нижние ярусы повышенной массивности и верхние ярусы, имеющие меньшие размеры. При возведении верхних частей пилонов заказчиком были оговорены ускоренные темпы ведения работ, при которых срок оборачиваемости переставной опалубки PERI не должен превышать 12-14 дней на один ярус. Очевидно, что одной из задач ускоренного поярусного возведения конструкций является определение значения максимальной температуры бетона нижележащей захватки, при которой свежеложенный бетон

разогреется до опасных величин и при этом в образовавшемся массиве разброс температур не превысит предельно допустимых значений, обеспечивающих трещиностойкость всей конструкции.

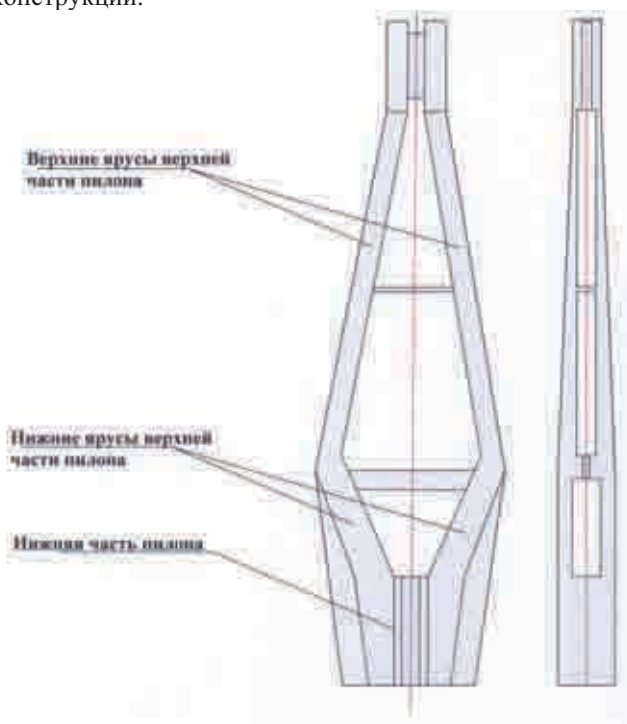


Рисунок 1. Общий вид пилона

При возведении ответственных сооружений обычно принимается, что температура основания, на которое укладывается бетон, не должна превышать 30°C . Это связано с увеличением максимальной температуры вновь укладываемой бетонной смеси и образованием больших перепадов температур в конструкции, приводящим в конечном итоге к появлению температурных трещин. С другой стороны, как показывает опыт строительства международного делового центра «Москва-Сити», изменение температуры основания в пределах от 30°C до 35°C не оказывает существенного влияния на температуру разогрева свежесуложенного бетона класса В25...В30. Однако при возведении рассматриваемого моста использовался бетон класса В35...В40, в связи с чем потребовалось провести дополнительные исследования по данному вопросу применительно к возводимому объекту.

Для этого были выполнены серии расчетов температурного режима твердеющего бетона при помощи специальной программы ZA, разработанной в ОАО ЦНИИС, которая позволяет решать в одномерной, двухмерной и трехмерной постановке дифференциальное уравнение теплопроводности с внутренним источником энергии при различных начальных и граничных условиях. В этой программе исследуемая область разбивается на элементарные блоки и в дальнейшем рассматривается их тепловое взаимодействие между собой и окружающей средой. При проведении расчетов учитывались реальные теплофизические характеристики материалов и окружающей среды, фактический расход цемента в бетоне и фактический состав бетонной смеси, фактиче-

ское термическое сопротивление опалубки и тепловой изоляции, реальные графики нарастания относительной прочности бетона при температуре твердения плюс 20°C и коэффициенты, учитывающие влияние температурного фактора на кинетику гидратации цемента и рост прочности твердеющего бетона [4]. При выполнении данной работы строились зависимости изменения температур бетона во времени и графики их распределения по толщине ранее забетонированного слоя и вновь забетонированной захватки в моменты формирования температурного поля нулевых напряжений, максимального разогрева бетона и максимальных перепадов температур по сечению конструкции в соответствии с расчётной схемой, представленной на рисунке 2.

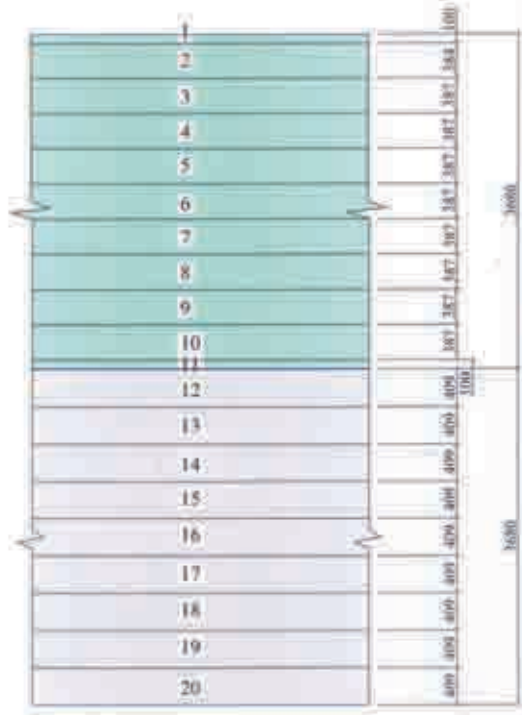


Рисунок 2 - Расчётная схема бетонирования ярусов верхней части пилона

Под температурным полем или температурной кривой нулевых напряжений [1] понимают распределение температур в конструкции из затвердевшего бетона, при котором в ней отсутствуют температурные напряжения. На основании выполненных и в НИИ транспортного строительства и многократно апробированных на производстве исследований установлено, что температурные поля нулевых напряжений формируются в бетоне на стадии его твердения, когда в цементном камне образуется стабильная, имеющая валентные связи, пространственная кристаллизационная структура из гидросиликатов кальция в слое с наибольшим отставанием процесса гидратации цемента. Как показали исследования в электронном микроскопе, это время соответствует периоду, когда прочность твердеющего бетона в слое с наибольшим отставанием процесса гидратации цемента составляет 26...30% от прочности бетона, твердеющего при температуре 20°C, в возрасте 28 суток. В бетоне, твердеющем при переменных температурах, это время определяют на основании теплофизических расчетов с использова-

нием такого понятия как «приведенное к температуре 20°C время твердения бетона». Температурные поля нулевых напряжений бывают выпуклыми и вогнутыми. При выпуклом поле нулевых напряжений температура бетона в середине конструкции выше, чем в ребрах и на боковых поверхностях, при вогнутом - температура на наружной поверхности конструкции выше, чем в центре. Температурное поле нулевых напряжений бывает благоприятным, повышающим трещиностойкость конструкции, и неблагоприятным, снижающим ее трещиностойкость. Выпуклое температурное поле нулевых напряжений является благоприятным, так как при выравнивании температур средняя часть конструкции стремится иметь большие температурные деформации, чем наружные части. Однако при остывании внутренних слоев поверхностные слои конструкции пытаются препятствовать деформациям внутренних слоев, из-за чего наружные слои оказываются сжатыми и повышающими трещиностойкость конструкции. Вместе с тем выпуклость температурного поля нулевых напряжений не должна быть очень большой, так как при очень большой выпуклости при выравнивании температур по массиву конструкции могут возникнуть трещины в ее средней части. Имеющийся опыт возведения монолитных мостовых железобетонных конструкций показывает, что рациональная разность температур в выпуклом температурном поле нулевых напряжений не должна превышать 20...30°C. Вогнутое температурное поле нулевых напряжений является неблагоприятным, так как при выравнивании температур по массиву конструкции поверхностные слои пытаются иметь температурные деформации больше чем слои, расположенные в средней части конструкции. Но средние слои препятствуют деформации наружных, из-за чего наружные слои оказываются растянутыми, что снижает трещиностойкость конструкции. Вогнутое температурное поле чаще всего образуется при периферийном обогреве твердеющего бетона или при прибетонировании новых блоков к разогретым до высоких температур ранее забетонированным. В настоящее время допустимый перепад температур в бетоне принимают равным 20°C. Такое положение допустимо, когда по массиву конструкции в момент формирования температурного поля нулевых напряжений наблюдается равномерное распределение температур. В других случаях следует руководствоваться расчетными допустимыми перепадами температур. Подтверждением этому являются случаи, когда при выравнивании температур по массиву после периферийного обогрева и наличии перепада температур в 0°C, наблюдалось растрескивание конструкций.

Исходя из этого положения, в данном исследовании при определении допустимых перепадов температур учитывались описанные выше основные положения теории о собственном термонапряженном состоянии, формирующемся в твердеющем бетоне.

Первая серия расчётов была проведена при выдерживании бетона в обычной опалубке. Полученные таким образом данные сведены в таблицу 1, а графики изменения температуры и прочности твердеющего бетона и графики их распределения по толщине ранее забетонированного слоя и вновь забетонированной захватки показаны на рисунках 3, 4, 5.

Полученные результаты показали, что температуры укладки бетонной смеси, основания и окружающей среды оказывают существенное влияние на теплофизические процессы, происходящие в твердеющем бетоне, и, главным образом, на трещиностойкость рассматриваемого массива. Так, увеличение температур укладки бетонной смеси и окружающей среды увеличивает максимальный разогрев бетона, а изменение температуры основания оказывает влияние на перепады температур по сечению конструкции. И если, в независимости от начальных условий, в момент максимального разогрева бетона и в период максимальных перепадов, распределение температур приходит в

равновесие, то их разброс в период формирования температурных полей нулевых напряжений очень существенен и напрямую зависит от начальных условий. Этот фактор во многом определяет окончательный допустимый градиент температур, при котором в конструкции с учётом формирования благоприятного собственного термонапряжённого состояния обеспечивается трещиностойкость бетона. В целом же выполненные расчёты показали, что при выдерживании бетона в обычной опалубке трещиностойкость конструкции не обеспечивается из чего следует, что бетон должен твердеть в опалубке с более высоким термическим сопротивлением, что требует проведения дополнительной серии расчётов.

Таблица 1

№ п/п	Температура, °С			Максимальный разогрев бетона, °С	Перепады температур, °С		
	основания	бетонной смеси	окружающей среды		24 ч	96 ч/120 ч	288 ч
1	30	10	10	68	9	26	34
2	35			68	11	29	34
3	40			68	14	29	34
4	45			68	18	29	35
5	50			69	19	29	33
6	30	15	15	73	7	28	34
7	35			73	10	28	34
8	40			73	12	28	34
9	45			73	13	29	35
10	50			74	15	30	32
11	30	20	20	78	7	30	33
12	35			78	8	30	33
13	40			78	10	31	34
14	45			79	11	31	34
15	50			79	13	31	34

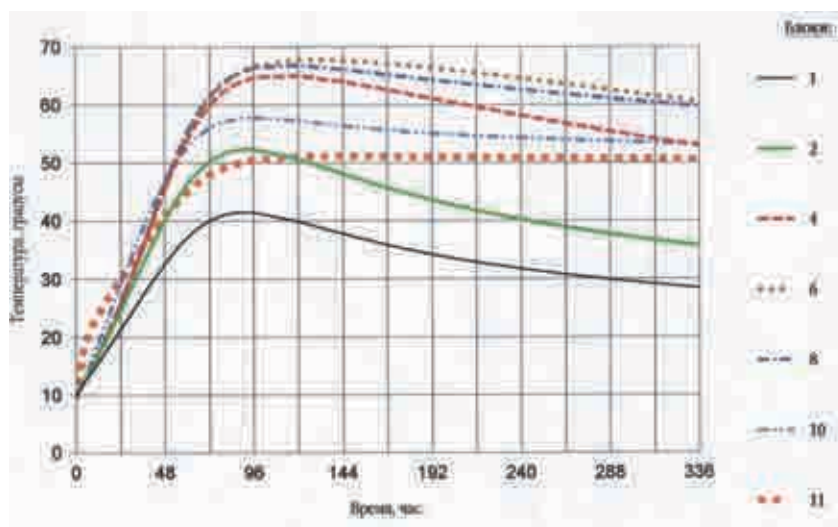


Рисунок 3 – График изменения температуры твердеющего бетона при $t_{б.см.}=30^{\circ}\text{C}$, $t_{осн.}=10^{\circ}\text{C}$, $t_{н.в.}=30^{\circ}\text{C}$ ($R=0,35\text{ м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$)

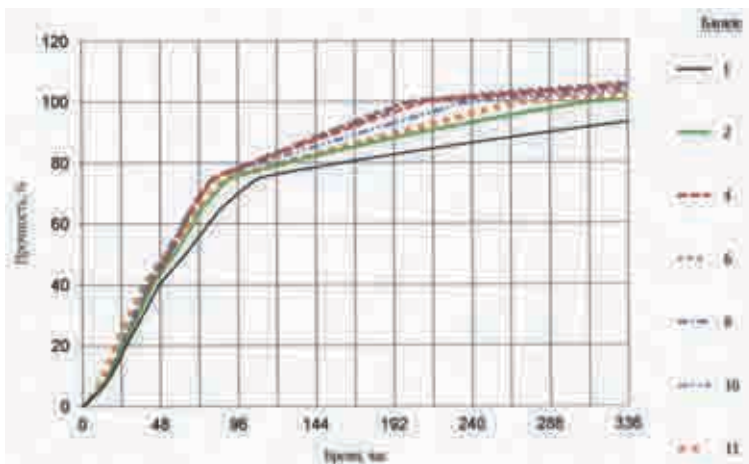


Рисунок 4 - График изменения прочности твердеющего бетона при $t_{б.см.}=30^{\circ}\text{C}$, $t_{осн.}=10^{\circ}\text{C}$, $t_{н.в.}=30^{\circ}\text{C}$ ($R=0,35\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$)

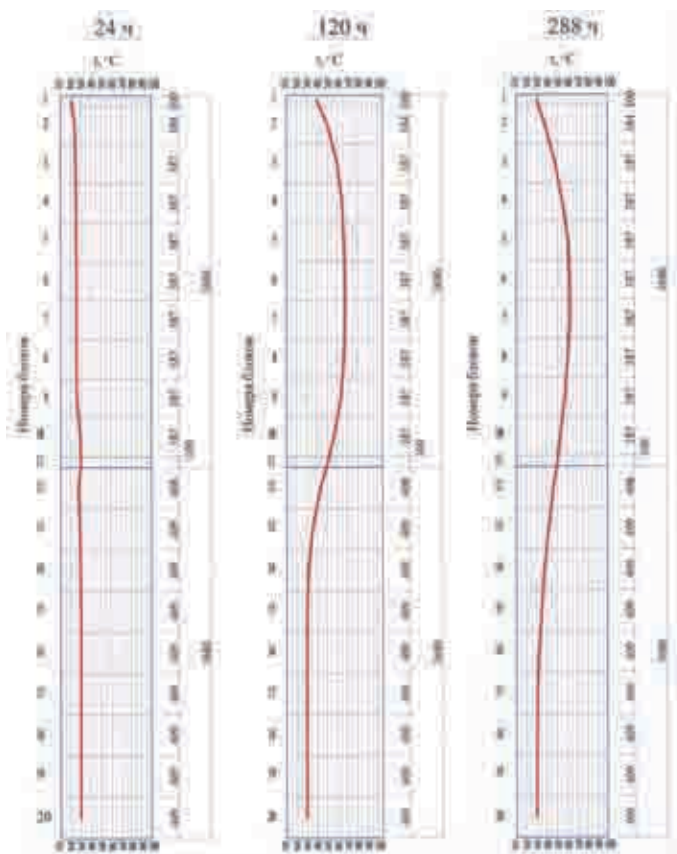


Рисунок 5 - Графики изменения температуры затвердевшего и твердеющего бетона при укладке бетонной смеси при $t_{б.см.}=10^{\circ}\text{C}$, $t_{осн.}=30^{\circ}\text{C}$, $t_{н.в.}=10^{\circ}\text{C}$ ($R=0,35\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$)

Вторая серия расчётов была выполнена исходя из положения, что термическое сопротивление тепловой изоляции бетона составляет $R=0,7\text{ м}^2\cdot\text{°C}/\text{Вт}$. Полученные по результатам исследований данные сведены в таблицу 2, а графики изменения температуры и прочности твердеющего бетона показаны на рисунках 6, 7 и 8.

Таблица 2

№ п/п	Температура, °С			Максимальный разогрев бетона, °С	Перепады температур, °С		
	основания	бетонной смеси	окружающей среды		24 ч	96 ч/ 120 ч	288 ч
1	30	10	10	68	7	20	24
2	35			68	9	20	24
3	40			68	12	20	24
4	45			68	14	18	25
5	50			69	17	18	25
6	30	15	15	73	4	21	24
7	35			73	5	19	24
8	40			73	9	18	24
9	45			73	10	18	24
10	50			74	13	18	25
11	30	20	20	78	5	22	24
12	35			78	6	20	24
13	40			78	7	20	25
14	45			79	8	20	26
15	50			79	10	19	26

Анализ таблицы 2 и представленных графиков позволил сделать следующие выводы. Во-первых, перепады температур по высоте захватки для рассматриваемых температурных режимов существенно сократились, а с учётом собственного термонапряжённого состояния вероятность трещинообразования по сравнению с предыдущим случаем заметно снизилась. Во-вторых, установлено, что бетонная смесь может укладываться на основание, имеющее температуру 40°C , что находится в рамках допустимых величин для естественного выдерживания бетона, а не его тепловой обработки, т.к. укладка бетона на основание с температурой выше 40°C ставит вопрос о рассмотрении монолитного бетона как материала, подвергаемого тепловой обработке, а это может изменить требования к его физико-механическим свойствам, что нежелательно для ответственных конструктивных элементов. В-третьих, укладку бетонной смеси на основание, имеющее температуру 45°C и 50°C , рекомендовать нельзя, так как при этом, кроме сказанного выше, существенно удлинится срок остывания бетона, что приведёт к удлинению сроков ухода за ним.

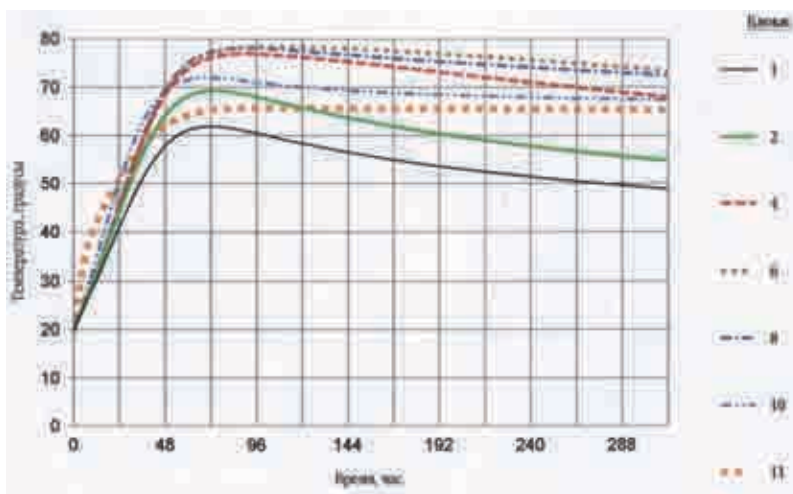


Рисунок 6 – График изменения температуры твердеющего бетона при $t_{б.см.}=50^{\circ}\text{C}$, $t_{осн.}=20^{\circ}\text{C}$, $t_{н.в.}=50^{\circ}\text{C}$ ($R=0,7\text{M}^{\circ}\text{C/Bm}$)

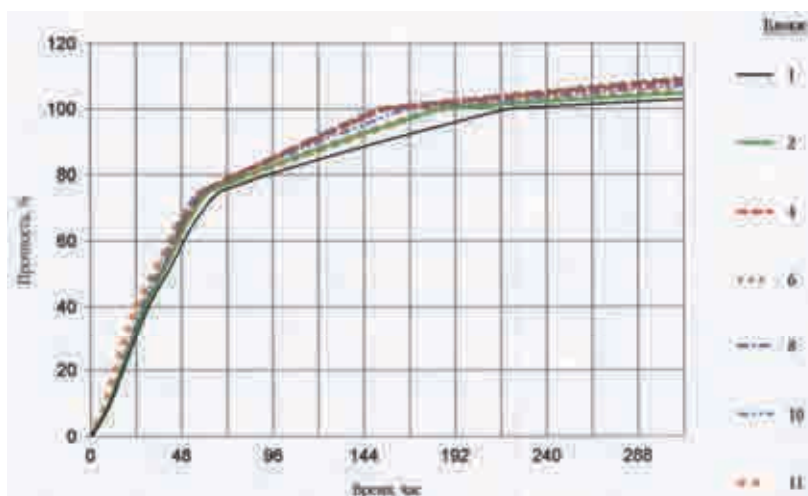


Рисунок 7 - График изменения температуры твердеющего бетона при $t_{б.см.}=50^{\circ}\text{C}$, $t_{осн.}=20^{\circ}\text{C}$, $t_{н.в.}=50^{\circ}\text{C}$ ($R=0,7\text{M}^{\circ}\text{C/Bm}$)

Полученные в результате исследования выводы стали частью большого комплекса мер по предупреждению трещинообразования в бетоне при ускоренном возведении пилонов вантового моста через реку Оку на обходе города Муром[2],[3]. В целом же, опыт исследования теплового и термонапряжённого состояния твердеющего бетона показал, что вне зависимости от конструктивных и архитектурных особенностей массивных объектов, применительно к ним можно разработать комплекс методов защиты от возникновения температурных трещин даже с учётом ускоренных темпов строительства.

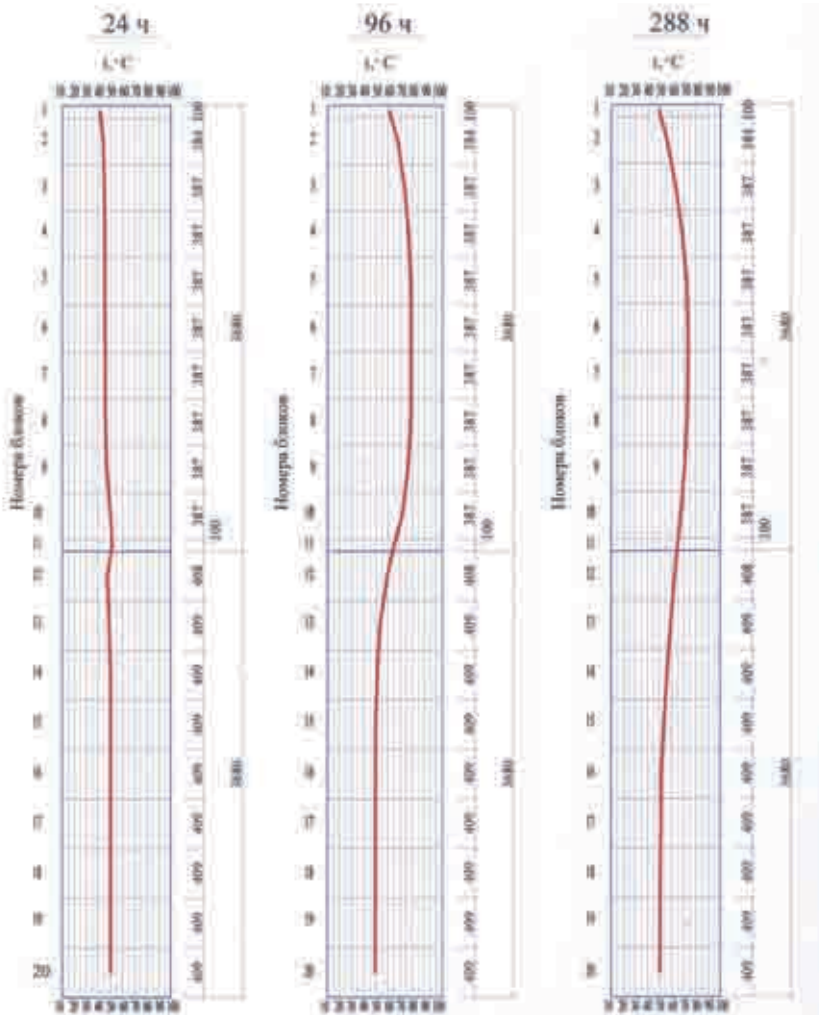


Рисунок 8 - Графики изменения температуры затвердевшего и твердеющего бетона при укладке бетонной смеси при $t_{б.с.м.}=20^{\circ}\text{C}$, $t_{осн.}=50^{\circ}\text{C}$, $t_{н.в.}=20^{\circ}\text{C}$ ($R=0,7\text{M}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$)

Литература

1. Лукьянов В.С., Соловьянич А.Р. Физические основы прогнозирования собственного термонапряженного состояния бетонных и железобетонных конструкций. Сборник научных трудов ЦНИИС, вып.73, М., 1972.
2. Соловьянич А.Р., Пуляев И.С. Предупреждение трещинообразования в бетоне при возведении нижних частей пилонов вантового моста через реку Оку на обходе города Муром. Вестник МГСУ, № 1. - М.: МГСУ, 2008. – с. 285-295.

3. Соловьянчик А.Р., Пуляев И.С. Трубное охлаждение водой твердеющего бетона нижних ярусов верхней части пилон моста через реку Оку. Вестник МГСУ, № 1. - М.: МГСУ, 2008. - с. 296-303.

4. Соловьянчик А.Р., Сычев А.П. Подготовка расчетов температурного режима твердеющего бетона на компьютерах. Сб. «Теплофизические аспекты технологии бетона и других строительных материалов на основе вяжущих веществ». Тезисы доклада совещания-семинара 3-5 декабря 1991, Минск, 1992.

Literature

1. Luk'yanov V.S., Solov'yanchik A.R. Fizicheskie osnovy prognozirovaniya sobstvennogo termonapryazhennogo sostoyaniya betonnyh i jelezobetonnyh konstrukcii. Sbornik nauchnyh trudov CNIIS, vyp.73, M., 1972.

2. Solov'yanchik A.R., Pulyaev I.S. Preduprezhdenie treschinoobrazovaniya v betone pri vozvedenii nijnih chastei pilonov vantovogo mosta cherez reku Oku na obhode goroda Muroma. Vestnik MGSU, № 1. - М.: MGSU, 2008. - с. 285-295.

3. Solov'yanchik A.R., Pulyaev I.S. Trubnoe ohlazhdenie vodoi tverdeyushego betona nijnih yarusov verhnei chasti pilona mosta cherez reku Oku. Vestnik MGSU, № 1. - М.: MGSU, 2008. - с. 296-303.

4. Solov'yanchik A.R., Sychev A.P. Podgotovka raschetov temperaturnogo rejima tver-deyushego betona na komp'yuterah. Sb. «Teplofizicheskie aspekty tehnologii betona i drugih stroitel'nyh materialov na osnove vyajuschih veschestv». Tezisy doklada soveschaniya-seminara 3-5 dekabrya 1991, Minsk, 1992.

г. Москва, 129337, Ярославское ш.26, МГСУ

Первый заместитель директора ГУП «НИИМосстрой» по научной работе, д-р техн. наук
В.Ф. Коровяков