

## ТЕРМООБРАБОТКА СТАЛЕФИБРОБЕТОНА

*М.В.Молодцов*

В статье описаны исследования, проведенные в области электропрогрева сталефибробетона. Исследован характер прохождения электрического тока через бетон, армированный стальными волокнами (фиброй), характер изменения удельного электрического сопротивления сталефибробетона и угла сдвига фаз установок прогрева в зависимости от различных технологических факторов.

Раскрыто влияния технологических факторов на темпы набора (кинетику твердения) и конечную прочность сталефибробетона, получены формулы для расчета прочностных характеристик сталефибробетона на этапе проектирования.

Рассмотрены закономерности формирования температурных полей произвольной точки сталефибробетонных конструкций на всех этапах выдерживания. Приведены сравнения экспериментальных и теоретических данных, доказывающих эффективность данного метода.

Сталефибробетон, материал получаемый при введении в бетонную смесь стальных волокон (фибр) известен давно. Он обладает повышенной, по сравнению с традиционными бетонами, прочностью на растяжение, трещиностойкостью, морозостойкостью, выносливостью при динамических и ударных нагрузках и, как следствие, долговечностью.

Увеличение объемов укладываемого сталефибробетона в последние годы, расширение производственно-технологической базы для производства данного материала на Урале, ставят вопрос о необходимости разработки технологии выдерживания сталефибробетона при отрицательных температурах, особенно учитывая, что значительная часть бетонных работ в регионах Урала и Сибири производится в зимний период.

Сегодня накоплен большой опыт по применению широко известных методов тепловой обработки. Одним из наиболее распространенных методом производства бетонных работ в зимнее время является электропрогрев. Преимущества электродного прогрева бетона по сравнению с другими методами заключаются: в значительном уменьшении потерь тепловой энергии; в относительно быстром достижении повышенных температур бетона; в возможности регулирования процесса прогрева. Электропрогрев является эффективным и универсальным, т.к. может быть применен при любой температуре наружного воздуха для конструкций любого типа и конфигурации. Электропрогрев является наиболее технологичным методом, позволяющим при наличии на строительной площадке источника электрической энергии в короткие сроки и без существенных дополнительных затрат произвести работы.

Анализ литературных источников показал отсутствие каких либо исследований, проводимых в области электропрогрева сталефибробетона. Поэтому прежде всего необходимо было исследование характера прохождения электрического тока через сталефибробетон, т.к. вводимые в бетонную смесь

стальные волокна, равномерно распределяясь по всему объему бетона и соприкасаясь друг с другом, могут спровоцировать такую ситуацию, при которой электрический ток, подобно в густоармированных конструкциях, будет проходить через арматуру и вызовет в цепи эффект "короткого замыкания". При высоких процентах армирования, кроме того, увеличивается склонность фибр к комкованию и образованию "ежей", что повышает вероятность возникновения замыкания.

Электрический расчет электропрогрева бетона заключается в определении расстояния между электродами и необходимого напряжения по величине удельного электросопротивления бетона. Данные о характере изменения удельного электрического сопротивления сталефибробетона, зависимости его значения от различных технологических факторов, таких как: водоцементное отношение (В/Ц), процентное содержание фибры ( $\mu$ ), модуль поверхности фибры - отношение боковой поверхности волокна к его объёму ( $S/V$ ) и крупность заполнителя (фракция щебня), явились первоначальным этапом исследований параметров электропрогрева сталефибробетона.

Эксперименты проводились на бетонах следующего состава: цемент – 450кг.; песок – 890кг.; щебень – 800кг., принятый с учетом большого количества ранее проведенных исследований. Используемые в экспериментах составы сталефибробетонов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Составы исследуемых сталефибробетонных смесей

№ состава	В/Ц	$\mu, \%$	$S/V$	Крупность щебня
1	0,5	1,0	8,0	5-10
2	0,5	1,0	8,0	5-20
3	0,5	0	–	5-20
4	0,5	0,5	8,0	5-20
5	0,5	1,5	8,0	5-20
6	0,5	2,0	8,0	5-20
7	0,5	1,0	5,7	5-20
8	0,5	1,0	10,0	5-20
9	0,55	1,0	8,0	5-20
10	0,6	3,0	8,0	5-20

В экспериментах по определению удельного электросопротивления использовались портландцементы М400, крупным заполнителем служил щебень фракции 5-10 мм и 5-20 мм, мелким – кварцевый песок с модулем крупности  $M_{кр}-2,5$ . Стальные волокна (ТУ-67-987-88) были изготовлены из стальной ленты по технологии, разработанной на кафедре ТСП ЮУрГУ.

Результаты эксперимента показывают, что электропрогрев сталефибробетона можно выполнить с помощью существующего стандартного прогревно-

го электрооборудования и приемов, используемых в строительной практике. При этом нами были проведены эксперименты в широком диапазоне процентов армирования смеси по объему (0,25...3%), результаты которых доказывают, что эффект "короткого замыкания" при электропрогреве сталефибробетона не наблюдается [1].

При этом наличие стальных волокон значительно изменяет величину и характер изменения удельного электросопротивления. Величины начального и минимального электросопротивления сталефибробетона в 2...3 раза меньше, время достижения минимального значения идентично. Характер изменения электрического сопротивления сталефибробетона отличается более равномерным протеканием и значительно меньшим темпом увеличения удельного электросопротивления со временем (рис. 1).

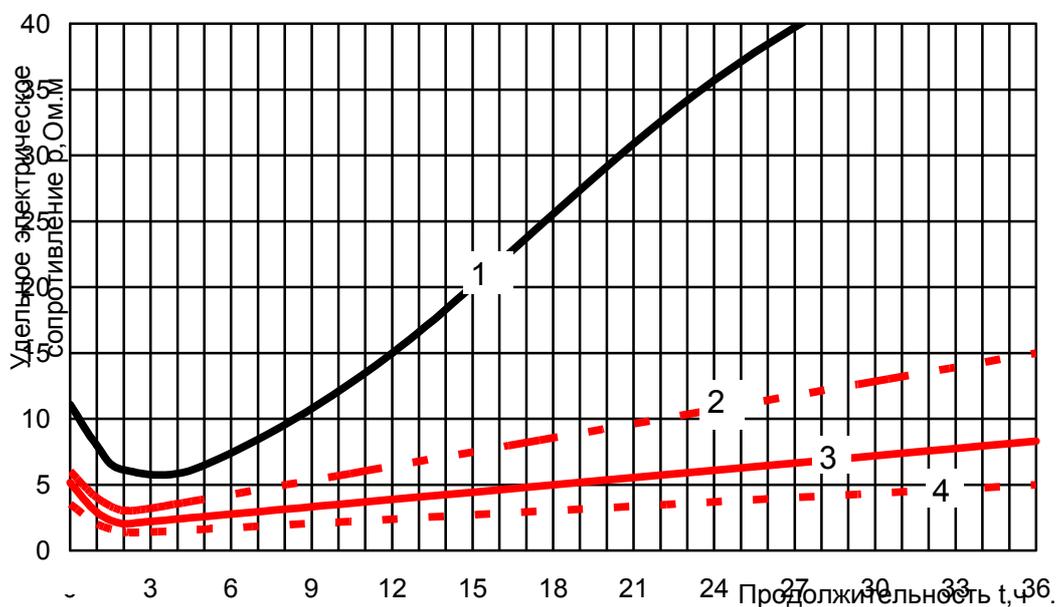


Рис. 1. Кривые изменения удельного электросопротивления:  
 1 – бетон, неармированный фиброй; 2 – сталефибробетон (0,5% армирования); 3 – сталефибробетон (1% армирования); 4 – сталефибробетон (2% армирования);

Экспериментально установлено, что крупность щебня не влияет на величину электрического сопротивления, увеличение водоцементного отношения уменьшает величину расчетного удельного электросопротивления не значительно, увеличение модуля поверхности фибры увеличивает электросопротивление в пределах 30%. Технологическим параметром, резко уменьшающим величину удельного электросопротивления сталефибробетона, по сравнению с бетонами, неармированными фиброй, является процент армирования смеси. Так, введении 0,5% фибры уменьшает удельное электросопротивление смеси в 2 раза, 1% – в 2,5 раза; 2,0% – в 3 раза.

Математическая обработка на ЭВМ результатов позволила получить аналитическое выражение для определения величины расчетного удельного электросопротивления сталефибробетона в зависимости от технологических параметров:

$$\rho = (-0,0132 S/V^2 + 0,2804 S/V - 0,4011) ((181,71\mu - 1087,7) В/Ц^3 + (-399,4\mu + 2031,8) В/Ц^2 + (282,51\mu - 1263,8)В/Ц + (-66,02\mu + 265,58) ), \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное электросопротивление сталефибробетона;  
 $S/V$  – модуль поверхности фибры;  
 $\mu$  – процентное содержание фибры по объему;  
 $В/Ц$  – водоцементное отношение.

По полученным данным построена номограмма по определению величины расчетного удельного электросопротивления сталефибробетона в зависимости от технологических параметров в процессе электропрогрева (рис. 2).

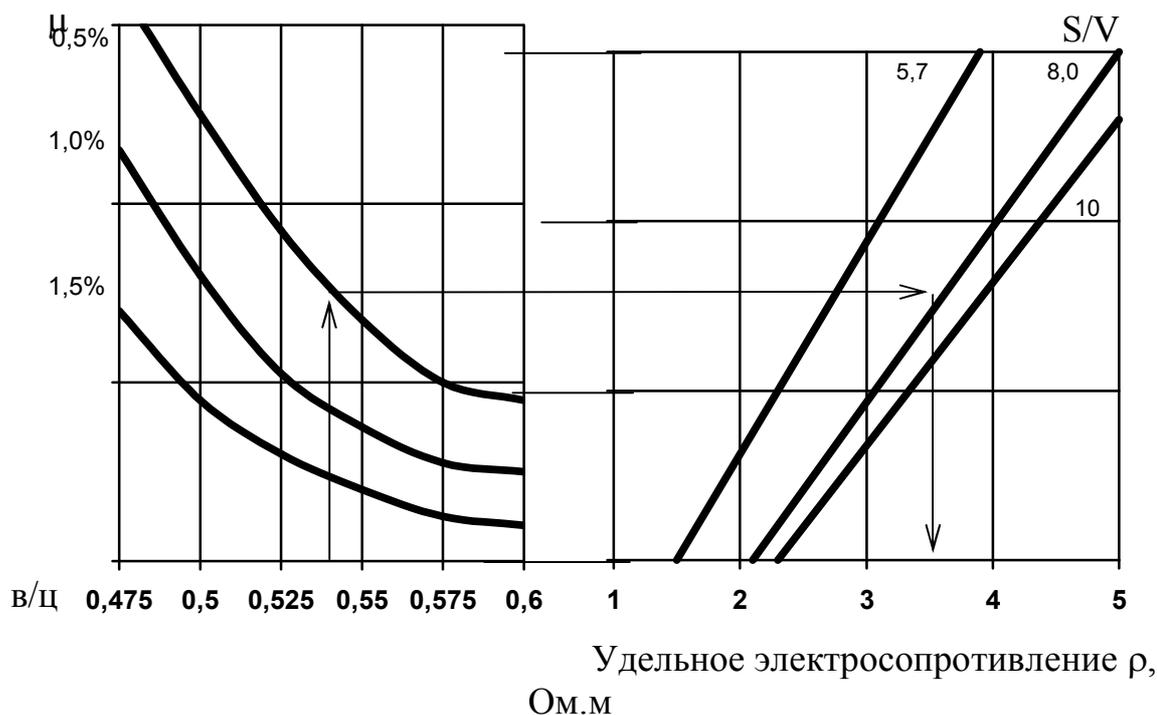


Рис. 2. Номограмма для определения расчетного удельного электросопротивления сталефибробетона

Из рисунка 1 наглядно видно, что темп роста величины электросопротивления сталефибробетона, в сравнении с традиционными бетонами, меньше в 6...10 раз, что позволяет осуществлять прогрев в более длительный период набора прочности в отличие от обычных бетонов, прогрев которых невозможен через двое суток твердения. Результаты исследований свидетельствуют о

наличии тенденции к дальнейшей стабилизации электросопротивления, однако по истечении 90 дней проведения эксперимента электросопротивление продолжало незначительно увеличиваться, что указывает на необходимость проведения дальнейших, более продолжительных исследований в этой области.

При переменном токе, с помощью которого производится нагрев бетонов, имеет место как активная мощность (идущая непосредственно на нагревание), так и реактивная мощность, вызванная сопутствующими переменными полями (а также расходуемая на нагрев проводов, опалубки и утеплителя). В процессе экспериментов было отмечено, что ферромагнитные свойства фибры могут увеличивать реактивную составляющую мощности при электропрогреве сталефибробетона. На основе экспериментальных исследований определены зависимости угла сдвига фаз от состава смеси и продолжительности твердения [2]. Установлено, что применяемые на практике проценты армирования смеси являются оптимальными с точки зрения минимизации реактивной составляющей мощности при электропрогреве сталефибробетона и позволяют повысить коэффициент полезного действия установок прогрева сталефибробетонных конструкций, зависящих от угла сдвига фаз (рис. 3).

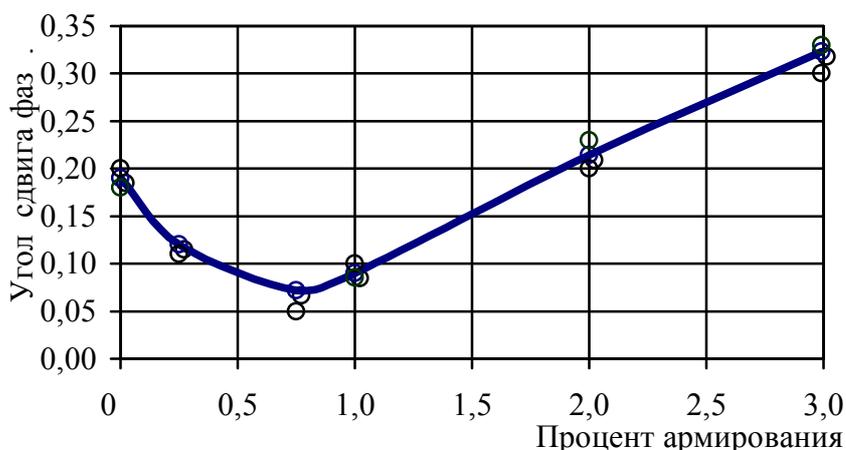


Рис. 3. Зависимость угла сдвига от процента армирования бетона

Следующим этапом изучался один из основных расчетно-контролируемых технологических параметров при производстве бетонных работ в зимний период – прочность. Прочность бетона на сжатие является одной из важнейших качественных характеристик и, зная закономерность ее изменения, можно прогнозировать, а в необходимых случаях и корректировать, режимы теплового воздействия. Однако прочность на сжатие для сталефибробетона не в полной мере отражает влияние наличия фибры, поэтому кроме прочности на сжатие определялись прочности на растяжение при изгибе и при раскалывании по стандартной методике описанной в ГОСТ 10180-90 (рис. 4).



Рис. 4. Испытание образцов на растяжение при изгибе

Были проведены исследования влияния различных технологических факторов на темпы набора и конечную прочность сталефибробетона нормального хранения, а также влияние температуры на кинетику твердения и величину конечной прочности сталефибробетона.

В результате проведенных исследований установлено, что прочность сталефибробетона в 28-ми суточном возрасте нормального хранения (табл. 2) прямо пропорционально возрастает с увеличением процента содержания волокон в бетоне, уменьшается с увеличением водоцементного отношения смеси и находится в прямой зависимости от модуля поверхности фибры.

Таблица 2

Прочность сталефибробетона исследуемых составов

Серия	Прочность на сжатие $R$ , МПа	Прочность на растяжение при изгибе $R_{tf}$ , МПа	Прочность на растяжение при раскалывании $R_{tt}$ , МПа
2	28,80	4,65	2,47
3	25,40	2,93	1,98
4	27,25	4,17	2,12
5	30,00	5,19	3,29

7	27,80	4,10	2,17
8	34,70	4,61	2,53
9	28,30	4,22	2,24
10	27,90	4,17	2,15

При введении 1% фибры по объему наблюдается увеличение прочности на сжатие на 13,5%; прочности на растяжение при изгибе на 60%. Изменение прочности сталефибробетона на растяжение при раскалывании имеет несколько иной характер: так, при введении 1% фибры по объему происходит увеличение прочности на 24,7%, при увеличении же процента армирования фибры по объему до 1,5% происходит дополнительный прирост прочности на 41,3% по сравнению с прочностью сталефибробетона, армированного 1% фибры по объему (рис. 5).

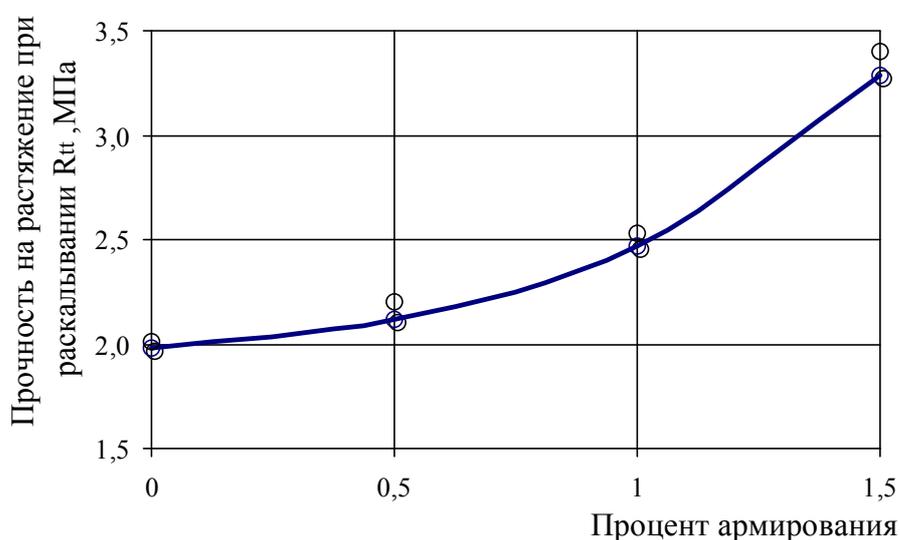


Рис. 5. Зависимость конечной прочности на растяжение при раскалывании от процента армирования сталефибробетонной смеси

Результаты исследований кинетики твердения сталефибробетона показали, что с увеличением процента армирования смеси темпы набора прочности увеличиваются, максимальный разброс значений прочности в зависимости от процента армирования смеси и периода набора прочности составляет порядка 13%. С увеличением температуры выдерживания сталефибробетона влияние наличия стальной фибры ослабляется, при температуре 80°C разброс значений прочности сокращается, но тенденция к увеличению темпов набора прочности с увеличением процента армирования смеси при повышении температуры сохраняется (рис. 6).

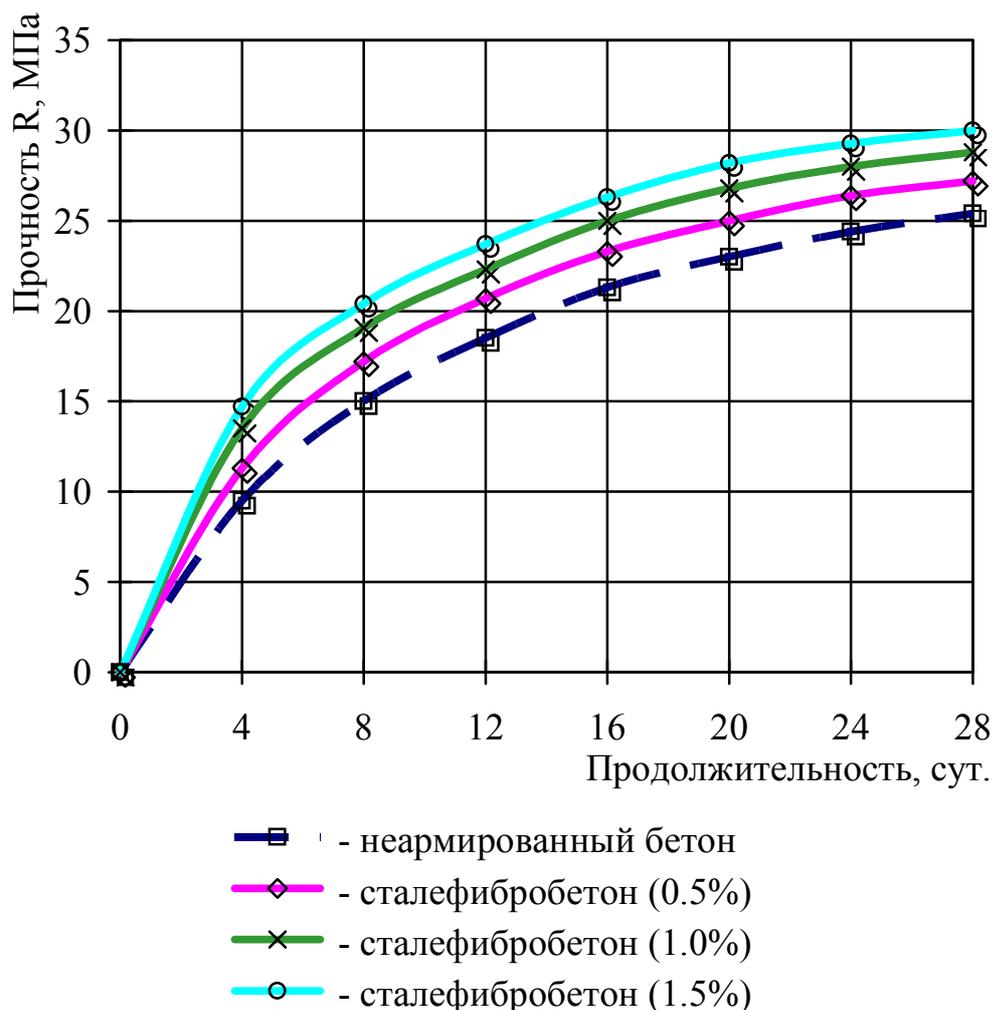


Рис. 6. Рост прочности сталефибробетона при температуре 20°C

Увеличение температуры выдерживания сталефибробетона позволяет сократить время набора марочной прочности. Однако при тепловой обработке физико-химические процессы структурообразования, несомненно играющие ведущую роль в создании прочного искусственного камня сопровождаются еще чисто физическими явлениями, оказывающими иногда более значительное влияние на прочность бетона. Температурные расширения составляющих в бетоне при его тепловой обработке, возникновение и развитие остаточных деформаций, перераспределение влаги и неравномерное ее накопление, а также возникающие температурные градиенты – все это создает в нем сложное напряженное состояние и наносит существенный ущерб формирующейся структуре материала, нарушая ее плотность [3]. Дефекты структуры и пониженная плотность являются основными причинами недобора конечной прочности бетона и ухудшения других физико-механических свойств бетонов, подвергавшихся термообработке, по сравнению с бетонами нормального твердения (рис. 7).

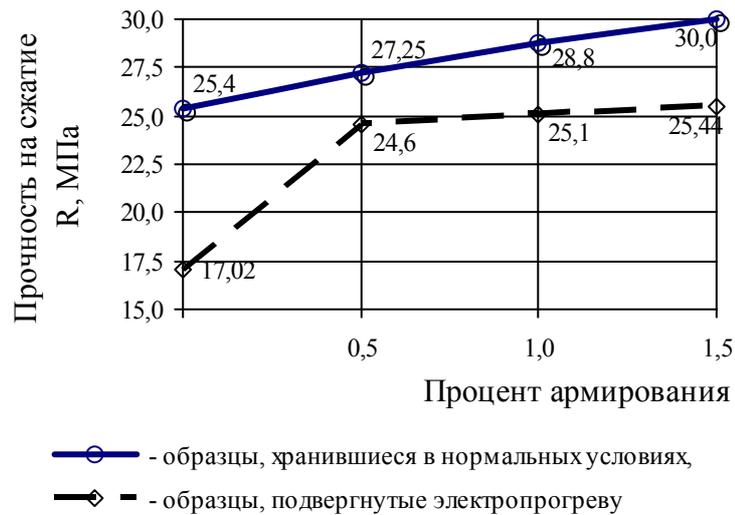


Рис. 7. Зависимость конечной прочности от процента армирования

Результаты экспериментов выявили, что у сталефибробетона, подвергнутого тепловой обработке, наблюдается потеря прочности в возрасте 28 суток (рис. 8). Однако недобор прочностных показателей сталефибробетоном на сжатие в 2-2,5 раза меньше, на растяжение в среднем в 1,5 раза меньше, чем для бетонов, неармированных фиброй, что можно объяснить перераспределением температурных напряжений за счет наличия фибры.

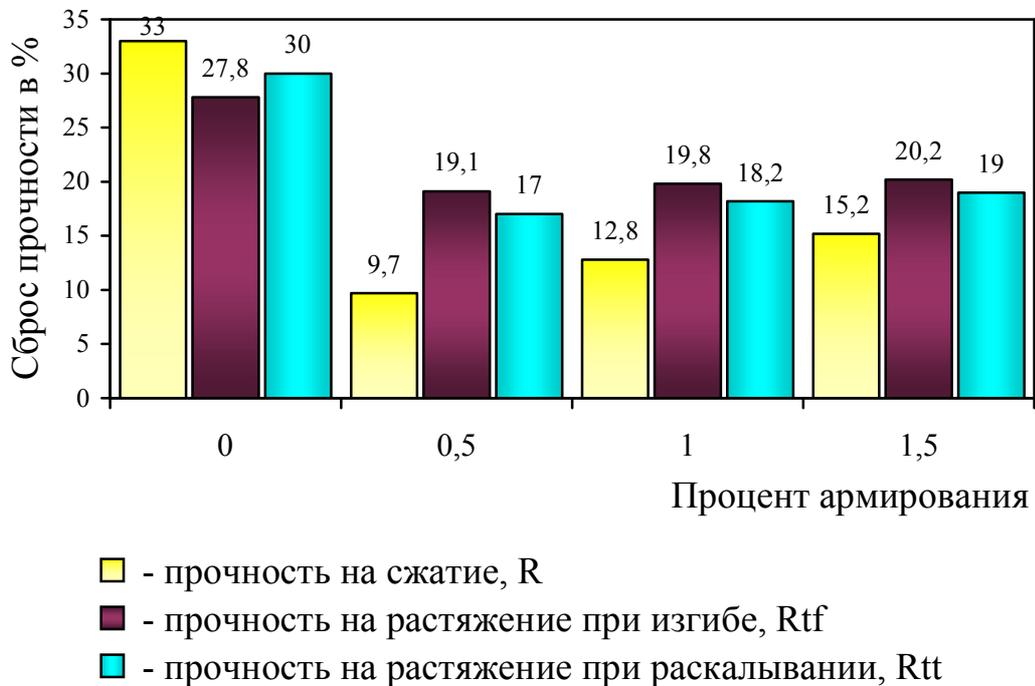


Рис. 8. Процент сброса прочности бетона при электропрогреве

Как известно тепловое воздействие на бетон осуществляется в достаточно широком интервале температур от 30 °С при использовании термоэлек-

трических матов до 140 °С при автоклавной обработке легких бетонов. Для определения влияния температур на конечную прочность сталефибробетона был проведен эксперимент по электропрогреву образцов из сталефибробетона при различных температурах. Образцы прогревались в комбинированных формах в течение суток при температурах выдерживания 20, 40, 60 и 80°С, а в дальнейшем помещались в камеру нормального хранения и испытывались после 28 суток твердения в ней (рис. 9).



Рис. 9. Образцы в температурной камере

По результатам эксперимента видно, что процессы, приводящие к потере прочности при электротермообработке, наиболее интенсивно протекают при температуре свыше 50°С, а невысокие положительные температуры благоприятно сказываются на процессах роста прочности. Это положение подтверждается повышенными на 13% значениями прочностей сталефибробетона, выдержанного при температурах 35...45°С, по сравнению с бетоном нормального хранения (рис. 10). Однако более мягкие режимы требуют более длительного выдерживания, что осуществимо для сталефибробетона, поскольку характер изменения его удельного электрического сопротивления позволяет выполнять прогрев длительное время.

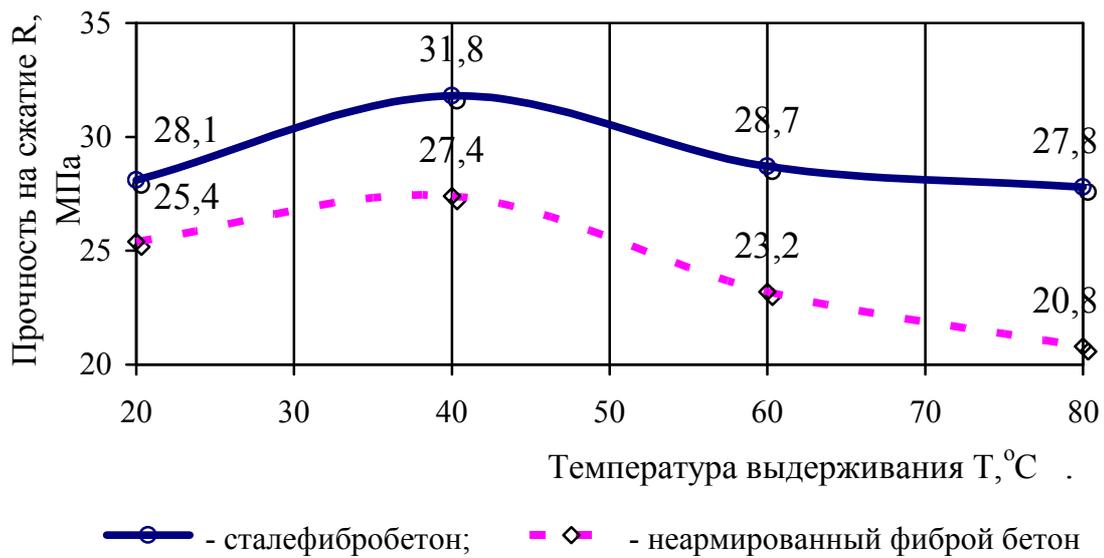


Рис. 10. Влияние температур электропрогрева на конечную прочность бетона

Полученные результаты проведенных исследований дали возможность представить формулу для расчета прочностных характеристик сталефибробетона на этапе проектирования. За основу была принята известная зависимость, которая дает относительно точные результаты в широком интервале прочности бетона и может быть использована при положительных и отрицательных температурах выдерживания:

$$R = R_{28} - Ae^{-B[(0,6 + 0,02t)^n - C]} \cdot \tau, \quad (2)$$

где  $R$  – относительная прочность бетона, % от  $R_{28}$  ;

$R_{28}$  – относительная прочность бетона нормального хранения в возрасте 28 сут., то есть 100%;

$A$  – коэффициент начальной прочности бетона;

$B$  – коэффициент темпа твердения;

$C$  – коэффициент, учитывающий уменьшение скорости твердения при отрицательных температурах;

$n$  – показатель степени;

$t$  – средняя температура за период выдерживания;

$\tau$  – продолжительность соответствующего периода.

Коэффициенты в формуле определяются в зависимости от прочности бетона в возрасте 3 суток и скорректированы для сталефибробетона добавлением коэффициента влияния процента армирования смеси:

$$\begin{aligned}
B &= 7,3 / (100 - R_3 K_\mu), \\
A &= 292 / \sqrt[3]{R_3} K_\mu, \\
n &= 1,4 + 50 / R_3 K_\mu, \\
C &= 0,054 + 1,33 / (100 - R_3 K_\mu), \\
K_\mu &= 0,1212\mu^4 - 0,9436\mu^3 + 1,2492\mu^2 - 0,1637\mu + 1,
\end{aligned}
\tag{3}$$

где  $R_3$  – относительная прочность бетона в возрасте 3 суток;  
 $K_\mu$  – коэффициент зависящий от процента армирования смеси.  
 $\mu$  – процент армирования сталефибробетона.

Для проверки полученных формул необходимо было сначала рассмотреть закономерности формирования температурных полей в сталефибробетонных конструкциях на всех этапах выдерживания.

В результате проведённых исследований установлено, что наличие стальной фибры приводит к более интенсивным изменениям в процессах перераспределения температур. Сокращается продолжительность нагрева определенного объема сталефибробетона, по сравнению с бетоном, неармированным фиброй, при прочих равных условиях. Так, для нагрева кубической конструкции из обычного бетона до  $80^\circ\text{C}$  потребовалось 5 часов при напряжении 100В, а для аналогичной конструкции выполненной из сталефибробетона – 2,5 часа при напряжении 75В (Рис. 11).

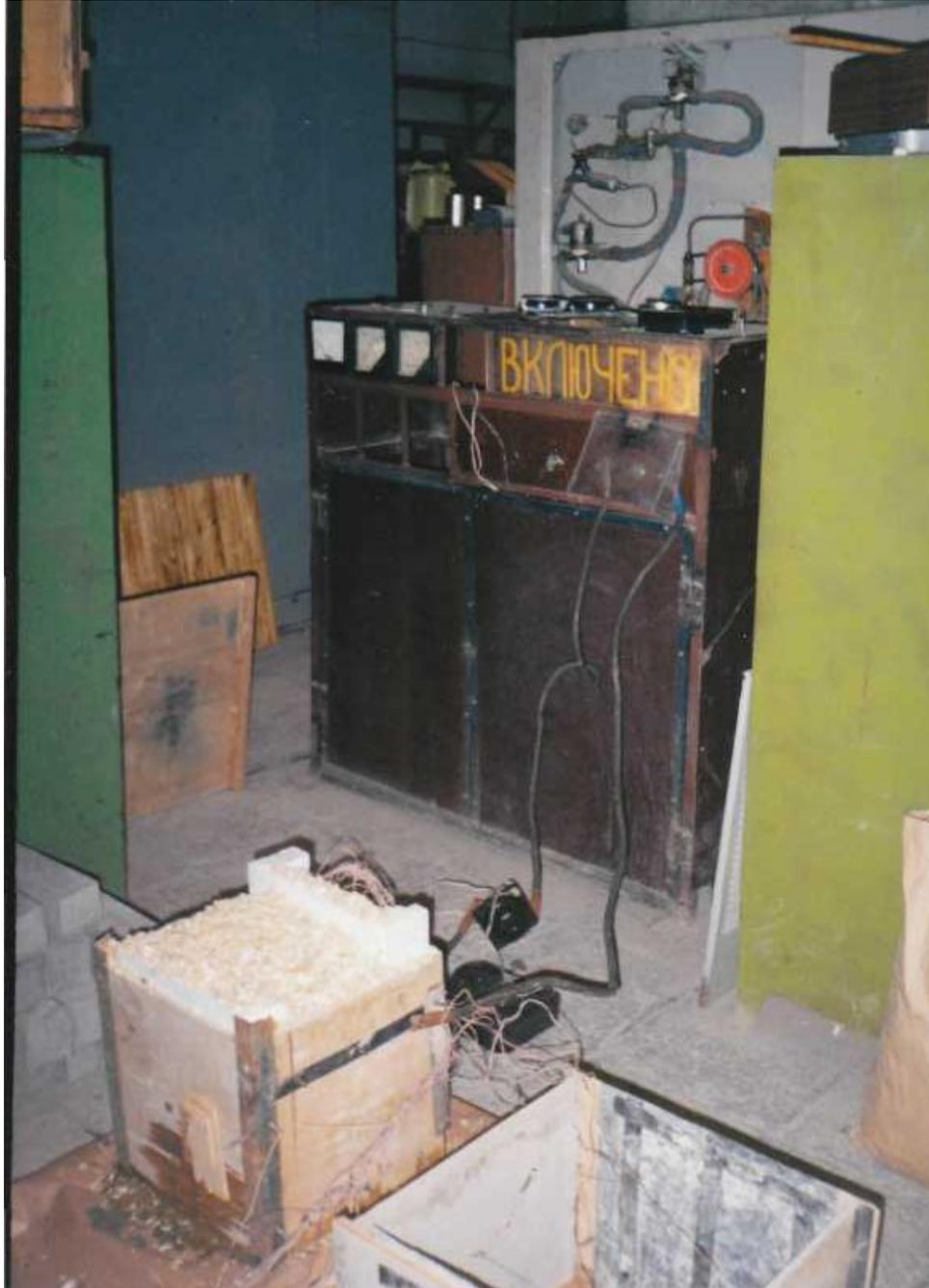


Рис. 11. Электропрогрев опытной конструкции

Основную сложность в расчетах технологических параметров выдерживания монолитных конструкций представляют расчеты наиболее продолжительного этапа, каким является остывание конструкции. Проведенные исследования остывания конструкций из сталефибробетона позволили рассчитать температурный коэффициент соотношения регулярной и иррегулярной стадий остывания  $K_t$ , определить коэффициент влияния процента армирования  $K_a$ . С учетом этого была уточнена формула расчета времени остывания центральной точки конструкции:

$$\tau_{ост}^u = \left(1 + \frac{1}{11,09 \cdot \text{Bi}^{-0,6}}\right) \cdot \frac{\gamma_{сфб} \cdot C_{сфб} \cdot \left(1 + K_\lambda \cdot K_\mu \frac{\alpha_{прив}}{\lambda_{сфб} \cdot M_n}\right)}{\alpha_{прив} \cdot M_n \cdot 3,6} \cdot \ln \frac{t_{б.н} - t_{н.в}}{-t_{н.в}} \quad (4)$$

где:  $\tau_{ост}^u$  – время остывания центральной точки;  
 $t_{б.н}$  – начальная температура бетона;  
 $t_{н.в}$  – температура наружного воздуха;  
 $m$  – темп охлаждения конструкции;  
 $\alpha_{прив}$  – коэффициент теплопередачи опалубки;  
 $M_n$  – модуль поверхности конструкции;  
 $\gamma_{сфб}, \lambda_{сфб}, C_{сфб}$  – соответственно удельный вес, теплопроводность и теплоемкость сталефибробетона;  
 $K_\lambda$  – коэффициент формы, для клинкерного бетона равный 1.14;  
 $K_\mu$  – коэффициент влияния стальной фибры.

Для получения аналитического выражения, описывающего процесс остывания произвольной точки конструкции из сталефибробетона, были определены соотношения бетона в произвольных точках с координатой  $X\tau$  и временем остывания в центральной точке. Была определена формула для расчета безразмерной координаты точек конструкции при расчете времени остывания сталефибробетона. Получены выражения и формулы, позволяющие определять расчетным путем время остывания произвольной точки конструкции из сталефибробетона.

$$\tau_{ост}^x = \tau_{ост}^u \cdot e^{-0,21 \frac{\alpha_{прив}}{\lambda \cdot M_n} \cdot x_\tau}, \quad (5)$$

Фактическая конечная прочность опытных конструкций рассчитывалась по графическим зависимостям для данного состава сталефибробетона. Одновременно были рассчитаны значения конечной прочности для всех контрольных точек опытных конструкций по аналитическим формулам 2 и 3. Сравнение прочности сталефибробетона, вычисленной по формуле с экспериментальными данными свидетельствует о довольно хорошей сходимости результатов. Разброс прочностных значений контрольных точек составляет от 2 до 8 % (табл. 3.)

Таблица 3

Таблица сравнения экспериментальных и расчетных прочностных показателей сталефибробетона

№ п/п (термопар)	$X_{\tau}$	$R_{расч}, \% R_{28}$	$R_{эксп}, \% R_{28}$	Разность значений, %
Конструкция №1				
1(2)	0	60,9	62,7	3,0
2(12)	0,25	59,4	61,0	3,0
3(3)	1	57,5	58,6	2,0
4(6)	2	54,3	56,7	4,5
Конструкция №2				
1(4)	0	69,0	74,5	8,0
2(9)	0,25	67,6	71,5	5,8
3(8)	1	65,4	67,8	3,7
4(11)	2	61,6	66,5	7,7
Конструкция №4				
1(3)	0	82,0	85,0	3,6
2(10)	0,074	81,0	85,5	5,4
3(11)	0,593	78,0	82,5	5,7
4(5)	0,125	81,0	87,0	7,4
5(4)	1	77,5	79,8	3,0
6(12)	2	73,0	75,5	3,5

Материалы исследований и разработанная технология электропрогрева сталефибробетона использовались для проведения на предприятии ЗАО "ЗЖБИ-1" г. Челябинска работ по разработке технологии возведения новой серии сборно-монолитных каркасных зданий с монолитными стыками из сталефибробетона. Разработанная методика расчетов технологических параметров была применена для возведения монолитных железобетонных конструкций при строительстве Бизнес-Центра "Спиридонов" в г. Челябинске.

Опытно-промышленное внедрение доказало, что для электропрогрева сталефибробетона может быть использовано традиционное прогревное оборудование, а эффективность метода достигается сокращением продолжительности технологических процессов выдерживания сталефибробетона, увеличением оборачиваемости опалубки, сокращением расхода электродной стали (до 46%) и обеспечением экономии электроэнергии на прогрев от 30 до 50% (рис. 12).

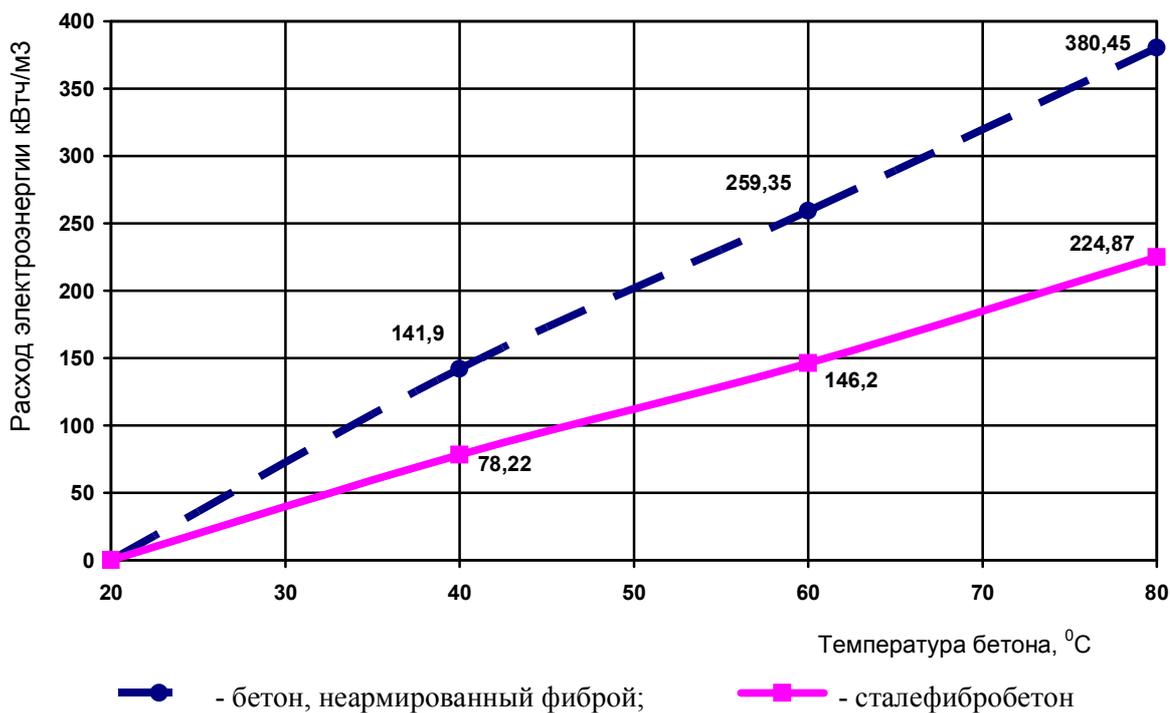


Рис. 12. Расход электроэнергии на прогрев

Представленные в работе материалы доказывают, что электропрогрев может стать эффективным методом интенсификации твердения сталефибробетона, позволяющим сократить продолжительность технологических процессов выдерживания при обеспечении требуемого качества. Осуществление электропрогрева идентичных конструкций из бетона, армированного фиброй и без нее показало, что вдвое сокращается время необходимое на повышение температуры сталефибробетона и на 10...15 % продолжительность остывания таких конструкций, т.к. темп остывания сталефибробетона выше. Кроме того время выдерживания конструкций из сталефибробетона возможно сократить ранней распалубкой и увеличивая при этом оборачиваемость опалубки. Так СНиП регламентирует перепад температур наружного воздуха и наружных слоев конструкции при распалубке. Эта разность назначается с учетом возникновения в бетоне растягивающих температурных напряжений и способности бетона противостоять им, но ведь прочность сталефибробетона на растяжение в среднем на 60 % больше прочности бетона без фибры. Исходя из таких предпосылок можно говорить, что увеличение перепада температур не приведет к нарушению структуры бетона, однако величину перепада следует определить в дальнейших исследованиях.

Наиболее перспективным направлением экспериментальных исследований является выявленное пониженное удельное электросопротивление сталефибробетона, которое позволяет производить прогрев конструкций при пониженных напряжениях, а самое главное более продолжительное время.

Время прогрева образцов из сталефибробетона может быть назначено от 1 до 15 суток.

Кроме того при введении стальной фибры качество бетона повышается, за счет равномерности прогрева и остывания. Поэтому следует искусственно вводить в обычный бетон небольшой процент стальных волокон для устранения недостатков электропрогрева и повышения качества бетонных конструкций.

#### Список литературы:

1. Особенности электротермообработки монолитных конструкций из сталефибробетона / С.Г. Головнев, Б.А. Евсеев, С.Б. Коваль, М.В. Молодцов и др.; Южно-Ур. гос. ун-т, 1998. – 8 с.: ил. 3, библиогр. – 3 назв. – Рус / Деп. в ВИНТИ 15.04.98 № 1151 – В 98.

2. Реактивная составляющая общей мощности при прогреве фибробетона / С.Г. Головнев, С.Б. Коваль, М.И. Грамм; М.В. Молодцов Исследование автоматизированных электроприводов, электрических машин и вентильных преобразователей: Сборник научных трудов. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 1998. – 3с.

3. Головнев С.Г. Оптимизация методов зимнего бетонирования. – Л.: Стройиздат. Ленингр. Отд-ние, 1983. – 235с. – ил.