

- ляющую погрешности. Использование метода профилирования и расчет дифференциального значения скорости распространения позволяет отказаться от использования поправок. Случайная составляющая погрешности измерений в этом случае не превосходит величину разброса оценок скорости распространения вследствие неоднородности структуры бетона.
- Объединение оценок прочности полученных методом упругого отскока и ультразвуковым импульсным методом позволяет снизить дисперсию объединенного результата в 2...3 раза, по сравнению с результатами измерений каждого из методов в отдельности.
 - Подтверждена эффективность ультразвукового импульсного метода для оценки степени неравнопрочности бетона наружных и внутренних областей монолитных колонн. Описанная методика профилирования сечения колонны прямоугольного сечения позволила оценить степень различия прочности бетона центральной и периферийной областей её сечения.

- R.Jones, I.Facaoru Incercareanedistructiva a betonului. Editura technical, Bucuresti.
- Снежков Д.Ю., Леонович С.Н. Неразрушающий контроль бетона в монолитном строительстве: совершенствование средств и методов. Монография. – Мн.: БНТУ, 2006.
- S.N.Leonovich, D.U. Snezhkov, D.Ju.Sobolevsky, O.V.Popov Complex method of the estimation of the foundation monolithic reinforced concrete mat's strength. - The international geotechnical symposium «PREVENTIVE GEOTECHNICAL MEASURES ON REDUCTION of NATURAL and TECHNOGENIC DISASTER, on July, 25-27th, 2007, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia.
- S.N.Leonovich, D.U. Snezhkov Complex metod of strength estimation of the monolithic reinforced concrete structures. - FIB conference «Concrete structures stimulators of development». Dubrovnik, 2007.

Материал поступил в редакцию 10.12.07

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

SNEZKOV D.J., LEONOVICH S.N. Structure, as a method of an estimation неравнопрочности of a file of concrete by not destroying methods

In offered clause the aspect of practical use of not destroying means of the control for an estimation прочностных of parameters of monolithic concrete on construction of a sports complex "Minsk-arena" in one @ is considered Minsk. The data of tests submitted, the opportunities of increase of the information and reliability of the control of concrete of monolithic products are considered.

УДК 693.547.32

Кривицкая Т.В., Голубев Н.М.

ПРОГРЕВ БЕТОНА В МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ, ВОЗВОДИМЫХ ЗИМОЙ

Введение. В современных условиях Республики Беларусь весьма важной является задача по совершенствованию и изысканию новых технологий проектирования и производства работ возведения монолитных железобетонных конструкций в направлении на сокращение сроков строительства, экономию энергетических затрат и улучшения качества.

Проблема увеличения объемов капитального строительства, выдвинутая программой социально-экономического развития Республики Беларусь, связана с задачами совершенствования и повышения интенсивности выполнения основных видов строительно-монтажных работ, которые особенно в зимних условиях существенно замедляются, из-за чего нарушается ритмичность производства и увеличивается общая продолжительность строительства [1, 2, 5, 6]. С наступлением холодов и морозов, перед строительными предприятиями, которые осуществляют производство работ по возведению монолитных бетонных и железобетонных конструкций, постоянно возникают задачи по выбору и назначению организационно-технологических методов термообработки бетона, обеспечивающих достижение его прочности в пределах 50 – 70 % от $f_{c, cube}^G$ [15, 16].

Помимо известных разработок ЦНИИОМТП, НИИЖБ и других [1], были проведены глубокие исследования по термообработке таких конструкций с использованием греющих изолированных электропроводов [2]. Экспериментально-практическая работа проводилась на объектах г. Минска и г. Бреста (бизнес-центр "Европа" по ул. Сурганова, общественно-административное здание по ул. Мясникова 6, жилой дом № 3 в квартале № 10 малоэтажной застройки в границах пр. Победителей – проезд Дрозды – река Свислочь в г. Минске, 90 и 55 –квартирные жилые дома в г. Бресте, МКР – 5).

В статье приводятся результаты исследований в этом направлении и применение их на практике.

Особенности и возможность применения зимой известных методов бетонирования. Известно, что при температуре среды ниже +5 °С твердение бетона замедляется, а при 0 °С и ниже совсем прекращается, и он замерзает [13, 10]. Поэтому необходимо принимать особые меры по утеплению опалубки и открытых бетонных поверхностей или использовать противоморозные и ускоряющие твердение добавки, выдерживая бетон по методу "термос" [12]. Здесь этот метод вне конкуренции среди других. Однако с понижением температуры среды ниже -5 °С ÷ -10 °С, требуемая технологи-

ческая прочность, при этом способе выдерживания не достигается, отсюда возникает необходимость прогрева бетона путем применения соответствующих методов термообработки, которые позволяют в зимнее время не снижать интенсивности производства работ [10].

Способ электродного прогрева доступен для самых различных конструкций и производственных условий [11, 5]. Однако в немассивных конструкциях, к которым относятся несущие каркасы и конструкции зданий, насыщенных арматурой (до 300 кг/м³), применение этого метода затрудняется из-за возможных электрических замыканий электродов на арматуру и образования деструктивных процессов в бетоне при термообработке.

Многие другие методы прогрева бетона из-за повышенных затрат на электроэнергию и увеличения стоимости, являются тоже мало приемлемыми. Поэтому при проведении ряда исследований и разработок, касающихся производства бетонных работ в зимний период было установлено, что есть возможность технологического совершенствования метода прогрева с использованием греющих электропроводов и метода прогрева с добавками, которые целесообразно применять и в условиях пониженных температур наружного воздуха от -5 °С до -25 °С в немассивных конструкциях, насыщенных арматурой [11, 12, 2].

Одним из важных технологических параметров при проектировании режимов прогрева является показатель требуемой мощности, что, безусловно, связано с предстоящими потерями тепла в период укладки и термообработки бетона в опалубке. С этой целью проведены многочисленные эксперименты в производственных условиях при возведении наиболее распространенных конструкций массивностью по модулю поверхности $M_n = 4 \div 16 \text{ м}^1$, предусматриваемых в проектах. Количественные значения исследуемых показателей определялись путем точных замеров современными измерительными приборами.

Проведены теоретические расчеты по потерям тепла бетонной смесью за технологические циклы укладки, выдерживания и 2⁻стадийного прогрева, $Q_{пр.}$ по известным научным положениям теплотехники и рекомендациям по зимнему бетонированию [3, 4, 1].

При этом учтены: потери на нагрев опалубки $Q_{оп.}$ Дж, потери на нагрев арматуры $Q_{ар.}$ Дж, потери на испарение влаги $Q_{вл.}$ Дж, потери на теплопередачу в окружающую среду $Q_{пот.}$ Дж, расход тепла на начальный подъем температуры в уложенном бетоне $Q_{нб.}$

Кривицкая Тамара Васильевна, инженер, аспирант Белорусского национального технического университета.

Голубев Николай Михайлович, кандидат технических наук, декан строительного факультета Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220027, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 65.

Дж, расход тепла на поддержание температуры от потерь при изотермическом прогреве $Q_{уп}$, Дж.

Расчеты сравнены с экспериментально-производственными данными термообработки, в которых учтено влияние притока тепла, выделяемого в результате гидратации цемента, Q_u [1, 4], а также потери за счет испарения и теплопроводности через опалубку в стационарном режиме [7].

В результате многочисленных расчетов тепло- и электротехнических данных и натурных опытов, проведенных с точными инструментальными замерами, определены надежные показатели для проектирования прогрева бетона в монолитных конструкциях, как при подготовке к производству (в ППР), так и в оперативном режиме по ускоренному варианту расчета. Ряд этих данных приведен в таблице 1, для некоторых разновидностей распространенных конструкций, которые являются исходными при определении продолжительности их прогрева, подборе и расстановке греющих проводов, обеспечивающих в комплексе достижение требуемой прочности прогреваемого бетона, что подтверждается результатами проектирования и внедрения.

Важным технологическим показателем в организации прогрева является определение реальной продолжительности, $t_{пр}$, которая обеспечит уверенное достижение 70 % - ой прочности к концу термообработки. По графическим номограммам можно установить взаимосвязь планируемой прочности с температурными режимами прогрева (30, 40, 50, 60 °C) и требуемой для этого продолжительности в часах (рис. 1).

Методика определения ожидаемых показателей осуществляется следующим образом. Например, для данного примера термообработки колонны, требуется определить продолжительность ее прогрева при температурном режиме 60 °C, чтобы была достигнута прочность бетона 70 % от $f_{с, cube}^G$. Для этого надо из точки характеризующей эту

прочность, на вертикальной линии (ординат), равную 70 %, провести прямую до пересечения с кривой линии 4 (рис. 1),

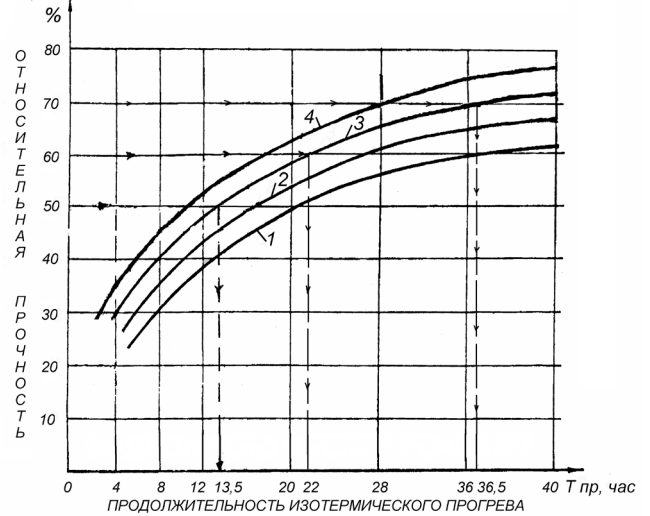


Рис. 1. Зависимость относительной прочности бетона от его температуры и продолжительности изотермического прогрева

1 — $t_{пр} = 30$ °C; 2 — $t_{пр} = 40$ °C; 3 — $t_{пр} = 50$ °C; 4 — $t_{пр} = 60$ °C

характеризующей температуру прогрева 60 °C. Далее из этой точки пересечения, опуская перпендикуляр, на горизонтальную прямую, получим искомое значение продолжительности прогрева, равное 36,5 часов. Действуя аналогичным образом на графике, но в обратном

Таблица 1. Расчет мощности по элементам

№ п/п	Наименование элемента	Размер элемента			Затраты тепла (энергии) на подъем температуры одной конструкции			Мощность в зависимости от времени подъема температуры				
		В	Т	L	кДж	ккал	кВт час	3 час.	4 час.	5 час.	6 час.	
		м	м	м				кВт				
1.	Колонна.	ширина	толщин	высота								
		0,4	0,4	3,1	97830	23365	27,3	9,1	6,8	5,5	4,5	
		0,2	0,2	2,0	19073	4555	5,32	1,8	1,3	1,1	0,9	
		0,4	0,5	4,5	173217	41370	48,3	16,1	12,1	9,7	8,1	
		0,3	0,4	3,5	85500	20420	23,85	7,9	6,0	4,8	4,0	
2.	Балка	ширина	высота	длина								
		0,2	0,3	6,0	105537	25206	29,4	9,8	7,4	5,9	4,9	
		0,3	0,4	3,0	113693	27154	31,7	10,6	7,9	6,3	5,3	
		0,4	0,52	4,8	357196	85311	99,6	33,2	25,0	20,0	16,6	
		0,4	0,6	6,0	493125	117755	137,6	45,9	34,3	27,5	23,0	
3.	Плита перекрытия	ширина	длина	высота								
		6,0	6,0	0,08	824860	197005	230	76,7	57,5	46,0	38,4	
		6,0	6,0	0,2	1929404	460808	538	179,4	134,6	107,7	90,0	
		6,0	6,0	0,26	3315069	791753	924	308,3	231,2	185,0	154,1	
		4,0	6,0	0,1	754302	180153	210	70,1	52,6	42,1	35,1	
4.	Стена	толщин	длина	высота								
		0,2	6,0	3,0	693941	165737	194	64,5	48,4	38,7	32,3	
		0,3	6,0	3,0	1013839	242140	283	94,3	70,7	56,6	47,1	
		0,4	6,0	3,5	1498452	357882	418	139,3	104,5	83,6	69,7	
		0,5	6,0	3,0	1520141	363062	424	141,4	106,0	84,8	70,7	
		0,6	4,0	3,0	1193332	285009	333	111,0	83,2	66,6	55,5	

направлении, можно определить и другие значения, то есть процент от $f_{с, cube}^G$, гарантированной прочности и $t_{пр}$, температуру прогрева. Многочисленные сравнения данных, полученных таким графическим способом, показали, что они совпадают по точности с фактическими. Поэтому его вполне можно использовать при расчетах в ППР и оперативном режиме производства [2, 8, 9], что существенно поможет организаторам производства, с достаточной для практических целей точностью, назначать и контролировать реальность получаемых показателей при прогреве греющими электропроводами.

Практическая необходимость в греющих электропроводах должна определяться из требуемой расчетной мощности пример прогрева колонны сечением 40×40 см, высотой 3,0 м, в условиях температуры наружного воздуха $-15 \text{ }^\circ\text{C}$. Требуемое количество энергии на подъем температуры до $60 \text{ }^\circ\text{C}$ необходимо $27,3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$, а мощность на этот подъем за 6 часов составит $4,5 \text{ кВт}$ (табл. 1). На поддержание этой температуры в режиме изотермического прогрева экспериментально определено, что требуется $0,714 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$. Поэтому расчет греющих проводов проводился только на максимальное значение ($4,5 \text{ кВт}$), при этом мощность заложенных греющих проводов с избытком достаточна для изотермического прогрева.

Подаваемый ток с нижней стороны трансформатора с учетом безопасности производства работ принят 60 Вольт. Исходя из особенностей армирования и открытости колонн, было установлено, что температура бетонной смеси после укладки будет составлять $+18 \text{ }^\circ\text{C}$, а безопасный подъем температуры принят по $7 \text{ }^\circ\text{C}$ в час. Тогда продолжительность подъема температуры составит:

$$\tau = (60 - 18) : 7 = 6 \text{ часов.}$$

Длина греющих проводов, необходимая для достижения температуры $60 \text{ }^\circ\text{C}$, определится из удельной мощности проводов, $\rho_{уд}$, например 30 Вт/м , при продолжительности подъема 6 часов и составит:

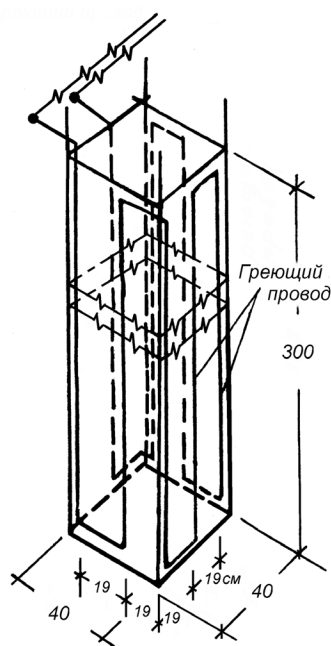
$$l_{пр} = P_{об} : \rho_{уд} \cdot T_{под} = 4500 : 30 : 6 = 25 \text{ м.}$$

Учитывая, что высота колонны h составляет 3,0 м, то количество витков, n греющих проводов по колонне, с учетом их общей длины, составит:

$$n_{sum} = l_{пр} : h = 25 : 3 = 8,3 \text{ шт.}$$

Рассматривая сечение колонны и ее габариты $40 \times 40 = 160$ см, принимаем, что для создания равномерной температуры прогрева эти витки проводов следует разместить по углам и непосредственно в середине, то есть через 19 см, как это показано на рисунке 2 "а".

а)



б)

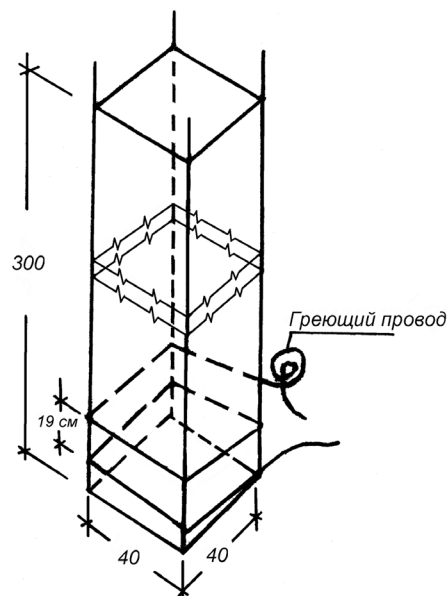


Рис. 2. Размещение греющих проводов в колоннах сечением 40×40 см, $h=3,0$ м

а) вертикальное размещение по высоте б) кольцевое размещение

Возможен вариант и кольцевого размещения по схеме рисунка 2 "б", который тоже может обеспечить требуемую мощность прогрева при раскладке провода той же длины с шагом по виткам 19 см.

Далее для проверочного обеспечения достаточной мощности определяется общее сопротивление электропровода:

$$R = l_{пр} \cdot \rho = 25 \times 0,14 = 3,5 \text{ Ом.}$$

Тогда физическая мощность провода составит:

$\rho_{уд} = U^2 / R = 60^2 : 3,5 = 1,2 > 0,714 \text{ кВт}$ – это та мощность, которая потребуется в период изотермического прогрева.

Разработаны приемлемые варианты применения греющих металлических проводов их марки, длины и шаг раскладки с приведенными схемами организации работ на чертежах, из которых следует, что для прогрева бетона в колоннах 40×40 см $h = 3,0$ м рекомендуется использовать греющие провода марки ПНСВ – $1 \times 1,2$ мм с $\rho = 0,14 \text{ Ом/м}$, общей длины 25,0 м на одну колонну в расчете на использование напряжения от трансформатора 42 В.

В оперативном режиме работы можно эти расчеты и не проводить, а воспользоваться расчетно-экспериментальными данными таблицы 2, в которой показатели длины электропровода, $l_{пр}$, его сопротивление, $R_{пр}$, удельная, $\rho_{уд}$ и общая мощность, $P_{об}$, а также температура нагрева, t , представлены во взаимосвязях, по которым без подробных расчетов можно определить нужные показатели и наметить оптимальные технологические решения [2, 12].

Таким образом, в результате проведенных научных исследований в НИЛ "Информатики и технологии в строительстве" уточнены и оценены влияющие факторы, с учетом которых разработаны и обоснованы методики расчетов и проектирования технологических режимов прогрева бетона зимой в монолитных конструкциях с использованием греющих проводов.

Методика проведенных исследований заключается в комплексном подходе к оценке технологии и организации работ по термообработке бетона зимой в монолитных конструкциях с корректировкой на научно-техническую модернизацию выполняемых работ, что в итоге, за счет уточнения и учета современных влияющих факторов, режимов и способов прогрева, существенно упрощает проектирование и ведет к повышению интенсивности производства работ. Результаты производственных испытаний и внедрений при проектировании (ППР) и возведении монолитных конструкций неоднократно подтверждались на следующих объектах: в г. Минске – Бизнес-центр "Европа", ул. Сурганова; магазин с паркингом, ул. В. Хоружей; комплекс жилых домов в границах проспекта Победителей – района Дрозды – реки Свислочь; в г. Бресте – жилые дома в микрорайоне №5.

Таблица 2. Параметры греющих проводников пригодных для температурных режимов от 40 до 80 °С и их взаимосвязь

Длина, l , м	Сопротивление, R , Ом	Мощность, P , Вт	Удельная мощность, p , Вт/м	Температура нагрева, $t_{н}$, °С
1	2	3	4	5
Напряжение 36 В, $\rho = 0,14$ Ом/м				
18,5	2,59	500,39	27,05	82,5
20,5	2,87	451,57	22,03	70,5
22,5	3,15	411,43	18,29	60,4
24,5	3,43	377,84	15,42	53,4
25,5	3,57	363,03	14,24	50,7
27,0	3,78	342,86	12,70	46,4
30,0	4,20	308,57	10,29	42,1
Напряжение 42 В, $\rho = 0,14$ Ом/м				
22,0	3,08	572,73	26,03	80,1
24,0	3,36	525,00	21,88	69,9
25,0	3,50	504,00	20,16	55,0
26,0	3,64	484,62	18,64	62,8
27,5	3,85	458,18	16,66	58,2
29,0	4,06	434,48	14,98	51,8
32,0	4,48	393,75	12,30	42,7
35,0	4,90	360,00	10,29	40,3
Напряжение 60 В, $\rho = 0,14$ Ом/м				
32,0	4,48	803,57	25,11	78,3
35,0	4,90	734,69	20,99	67,6
37,0	5,18	694,98	18,78	61,4
41,0	5,74	627,18	15,30	53,0
43,0	6,02	598,01	13,91	49,4
48,0	6,72	535,71	11,16	44,2
51,0	7,14	504,20	9,89	41,4
Напряжение 80 В, $\rho = 0,14$ Ом/м				
42,0	5,88	1088,44	25,92	80,2
45,0	6,30	1015,87	22,57	72,2
48,0	6,72	952,38	19,84	55,0
51,0	7,14	896,36	17,58	60,7
57,0	7,98	802,01	14,07	44,8
62,0	8,68	737,33	11,89	42,8

После проведения экспериментальных работ и анализа полученных данных предлагаемый метод сравнивался по эффективности с другими методами термообработки и прогрева бетона по основным показателям производства работ: энергозатраты \mathcal{E} , кВт·ч/м³, трудозатраты T , чел·ч/м³, продолжительность работ с учетом времени прогрева τ , сут. (табл. 3). С применением рассмотренных методов результаты по названным показателям существенно отличаются преимуществом в пользу метода прогрева с использованием электрогреющих проводов по предлагаемой технологии. Дорогим по показателям затрат труда и электроэнергии оказался электродный прогрев.

Обычное термосное выдерживание отличалось увеличением в 2 – 4 раза по показателю продолжительности работ, вследствие замедления роста прочности и, даже при использовании комплексных ускоряющих и противоморозных добавок (С – 3). Однако при этом выявилось, что при обогреве бетона с такими добавками при $t_{нв}$ ниже -10 °С были получены весьма любопытные значения. Потребляемая мощность в 2 – 3 раза была ниже, поскольку бетон не является электропроводником и отличается от вариантов с использованием греющих проводов. Требуемая прочность бетона достигалась в этих случаях также в 1,3 – 1,6 раза быстрее и при меньших затратах электроэнергии.

Таким образом, в целях ускорения производства работ и сокращения их продолжительности при возведении монолитных конструкций зимой со снижением энергетических затрат на прогрев бетона с использованием ускоряющих добавок, целесообразно создавать “толчок” краткого и невысокого (40 °С) прогрева в начальной стадии с тем, чтобы бетон с добавками надежно твердел и ускоренно набирал требуемую прочность. При применении бетонов без добавок в среде с

температурой ниже -10 ÷ -15 °С целесообразно использовать прогрев греющими электропроводами, что помимо ускоренного достижения прочности, обеспечивает снижение затрат ресурсов (табл. 3).

По полученным результатам исследований и производства нам удалось разработать автоматизированную систему проектирования режимов прогрева бетона в монолитных конструкциях, возводимых зимой. Последовательность выполнения отдельных операций в компьютерном варианте заключается в нижеследующем:

- определение массивности и поверхности конструкций, на основе которых определяется и площадь поверхностей;
- определяются учетные параметры теплового воздействия на опалубку, арматуру, бетонную смесь и учет экзотермического тепла;
- устанавливаются температура среды и требуемая для прогрева бетона.

Все параметры определяются в расчете на 1 м³ укладываемой бетонной смеси, и расход тепла складывается из алгебраической суммы расходов, упоминаемых в аналитических предыдущих расчетах.

Учитывая общую сложность определения всех параметров, принят для этого процесс их моделирования и целесообразность создания модели электронной таблицы "Excel", как наиболее простой и доступной для всех категорий работников строительных организаций, имеющих в современных условиях компьютерные установки или карманные компьютеры.

На первом этапе разработано шесть моделей определения режимов тепловой обработки для шести основных разновидностей монолитных конструкций.

Программой предусмотрена последовательность действий по реализации модели прогрева конструкций, в компьютерном исполнении, посредством реализации которой выбирается требуемый

Таблица 3. Показатели затрат по возведению монолитных конструкций с использованием сравнимых методов термообработки

№ п/п	Температура укладываемой смеси, $t_{см}, ^\circ\text{C}$	Прочность бетона, % от f_c, G_{cube}	Модуль поверхности конструкции, $M, \text{м}^2$	Температура наружного воздуха, $t_{нв}, ^\circ\text{C}$	Энергозатраты, $\text{Э}, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$	Трудозатраты, $T, \text{ч}/\text{м}^3$	Продолжительность работ по термообработке, $\tau, \text{сут.}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Метод "термоса"							
1	20	50	2	-5	23,9	12,4	6,8
2	30	30	2	-10	25,1	11,7	5,6
3	30	30	2	-15	26,1	15,0	7,0
4	30	50	4	-15	28,5	17,3	8,3
Термос с противоморозными и ускоряющими добавками без прогрева							
1	20	50	2	-5	24,6	12,0	4,8
2	30	30	2	-10	25,7	12,7	5,0
То же с прогревом до $t = 40 ^\circ\text{C}$ и добавкой С – 3							
1	20	70	6	-10	39,2	19,2	2,8
2	30	50	4	-15	40,3	18,8	3,1
Электродный метод прогрева							
1	-	50	2	-5	58,4	13,7	2,3
2	-	30	2	-20	60,8	14,0	2,8
3	-	70	8	-5	90,6	17,3	2,9
4	-	50	10	-10	92,0	18,0	3,6
Обогрев греющими проводами							
1	-	30	2	-20	60,7	13,6	2,4
2	-	50	4	-15	70,4	13,1	2,9
3	-	50	8	-20	82,9	16,7	3,0
4	-	70	10	-10	90,3	18,2	3,2

вариант электронных таблиц. В каждой строке электронной таблицы приводятся параметры прогреваемых конструкций, а в вертикальных столбцах приводятся параметры, отражающие их особенности и условия тепловой обработки. Безусловно, что большинство окончательных и промежуточных данных в столбцах рассчитываются по введенным в электронные таблицы формулам и функциям, а исходные данные вводятся с клавиатуры компьютера.

В 2007 году это успешно внедрено в практику проектирования в строительных организациях Министерства архитектуры строительства РБ.

Заключение. Неоднократные примеры производства работ по возведению монолитных конструкций в сочетании с проведенными научными исследованиями по изысканию путей снижения продолжительности работ и снижения вынужденных энергетических затрат при зимнем бетонировании позволили выявить эффективность использования греющих проводов для качественного прогрева бетона в немассивных конструкциях с насыщением арматурой до $300 \text{ кг}/\text{м}^3$.

В соответствие с приведенными расчетами и вариантами прогрева установлены параметры греющих проводов, их длина и мощность, а также температура нагрева в изотермическом процессе и продолжительность, которые бы обеспечивали получение 70 % прочности от f_c, G_{cube} .

Разработаны научно-методические положения по расчету и проектированию режимов прогрева бетонных конструкций, по минимуму продолжительности работ и расходу энергетических затрат.

Проведены сравнения и уточнена эффективность применяемых методов зимнего бетонирования, на основе которых рекомендуется при температуре среды от -10 до $-25 ^\circ\text{C}$ применять прогрев бетона, как с использованием химических добавок, так и без них. Целесообразно продолжить дальнейшие исследования в этом направлении с подготовкой руководства для широкого практического пользования.

Представленные научно-методические разработки позволили создать обобщенную модель с использованием электронных таблиц Excel, позволяющую в автоматизированном режиме определять параметры эффективного протекания процессов тепловой обработки монолитных железобетонных конструкций, которая в 2007 году передана для освоения в проектные организации г. Минска и г. Бреста, что будет способствовать повышению эффективности строительства в дальнейшем.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях. НИИЖБ. – М.: Стройиздат. – 2005. – 270 с.

2. Проектирование технологии термообработки бетона с использованием методов контактного электрообогрева. БНТУ. – Мн., 2004. – 58 с.

3. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Гостехтеориздат. – 1952.

4. Блещик Н.П., Протьюко Н.С., Рыскин М.Н. Математические модели кинетики гидратации цемента // Материалы международной конференции: Инженерные проблемы современного бетона и железобетона, 12 – 17 ноября 1997. – С. 25–36.

5. Лысов В.П. Греющие электропровода в технологиях обогрева помещений и устройствах бытового и производственного назначения. – Мн.: БНТУ. – 2005. – 310 с.

6. Крылов Б.А. Возведение монолитных конструкций // Сб. "НИИЖБ 75 лет в строительстве". – М., 2002.

7. Лукьянов В.С. Расчет температурного режима бетонных и железобетонных конструкций при зимнем производстве работ. – М.: Трансжелдориздат. – 1934. – 182 с.

8. Бабицкий В.В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона. – Мн.: Строительная наука и техника, № 2. – 2005. – С. 33–38.

9. Ахвердов И.Н. Основы физики бетонов. – М.: Стройиздат. – 1981.– 464с.

10. Головнев С.Г. Параметры технологии и качество зимнего бетонирования. Строительство. № 5, 6.: Известия вузов. – 1995.

11. Шифин С.А. Практика применения греющего провода и технология транспортных сооружений // Технология и качество возводимых монолитных конструкций из бетона. / Научные труды ОАО ЦНИИС. Вып. 217. – М.: ОАО ЦНИИС. – 2003. – С. 216–221.

12. Абрамов В.С. Амбарцумян С.А. Методы и технические средства тепловой обработки бетона на основе применения электропроводных полимеров. – М., 1998.

13. Миронов С.А., Глазырина Е.Г. Влияние раннего замораживания на прочностные и деформативные характеристики бетона / Зимнее бетонирование и тепловая обработка. – М., 1975. – С. 71 – 87.

14. Арбеньев А.С. От электротермоса к синэнегробетонированию. Владимирский ГТУ. – Владимир, 1996. – 272 с.

15. Руководство по электротермообработке бетона. НИИЖБ. – М.: Стройиздат. – 1974. – 254 с.

16. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях в районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера. – М.: Стройиздат. – 1982. – 312 с.

Материал поступил в редакцию 10.01.08

The outcomes of researches on production of concrete work& in the winter for want of erection of monolithic constructions in Republic of Belarus are represented. The methods of a warm-up of concrete are considered, are offered new methodical positions on automation account and is organizational-technological positions on account, designing and fulfillment of work& with a warm-up of concrete heating by electrical wires.

УДК 539.3

Хвусевич В.М.

РАСЧЕТ КОРПУСА ТОЛСТОСТЕННОГО СОСУДА ПРИ СТАЦИОНАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Введение. На практике конструктивные элементы зданий и сооружений различного назначения в зависимости от условий эксплуатации имеют сложную форму, подвергаются воздействию температуры и механических нагрузок.

Для обеспечения их прочности, жесткости и одновременного снижения материалоемкости требуется анализ напряженно-деформированного состояния (НДС). Задачи по определению НДС, вызванного одновременным воздействием механических нагрузок и температур являются одними из сложных прикладных задач.

К такого рода сооружениям относятся и корпуса энергетических установок (реакторов), которые представляют собой цилиндрические сосуды со сложной формой поперечного сечения.

Для исследования НДС подобных конструкций необходимо поставить и реализовать задачи механики деформируемого твердого тела и, в частности, краевые задачи теории упругости и термоупругости.

Аналитическое решение таких задач практически невозможно, поэтому в инженерных расчетах используются различные численные методы, основным из которых в последнее время стал метод конечных элементов (МКЭ) и на основе которого разработано много программных пакетов. Как показывает практика [1], при реализации МКЭ внешних краевых задач теории упругости, термоупругости, теории пластичности и др. полученные результаты не всегда являются точными. В то же время при реализации подобного класса задач преимущество перед МКЭ имеет метод граничных элементов теории потенциала, который оказался незаслуженно забыт в последнее время.

В этой связи целесообразно применить этот метод для исследования НДС толстостенного сосуда, имеющего утолщения и перепады кривизны стенок, который подвергается воздействию температуры.

Постановка задачи. Метод исследования. Корпус сосуда представляет собой полый толстостенный цилиндр со сложной внутренней геометрией. Внутри и на контуре заданы температура и давление. Ввиду большой длины корпуса и специфики нагружения исследование НДС можно свести к решению плоской краевой задачи квазистационарной термоупругости. Тогда ввиду физической и геометрической симметрии достаточно рассмотреть четвертую часть области сечения (рис. 1).

Для реализации краевой задачи термоупругости сначала решается краевая задача теплопроводности.

Температура представляется формулой Грина [2] в результате получаем интегральное уравнение плоской краевой задачи теплопроводности:

$$2\pi T(x) = \oint_L \left[\frac{dT(y)}{dn_y} \ln \frac{1}{r} + T(y) \frac{\cos \varphi}{r} \right] dl_y, \quad (1)$$

где X, Y – соответственно параметрическая и текущая точки при интегрировании, L – граница области, $\vec{r}(x, y) = |y - x|$, $n(y)$ – направляющие косинусы внешней нормали контура области, φ – угол между радиус вектором \vec{r} и внешней нормалью $n(y)$, T – температура.

Используя решение Гудьера, краевую задачу термоупругости можно свести к решению изотермической задачи теории упругости [2].

Хвусевич Виталий Михайлович, кандидат технических наук, зав. кафедрой теоретической механики и сопротивления материалов Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

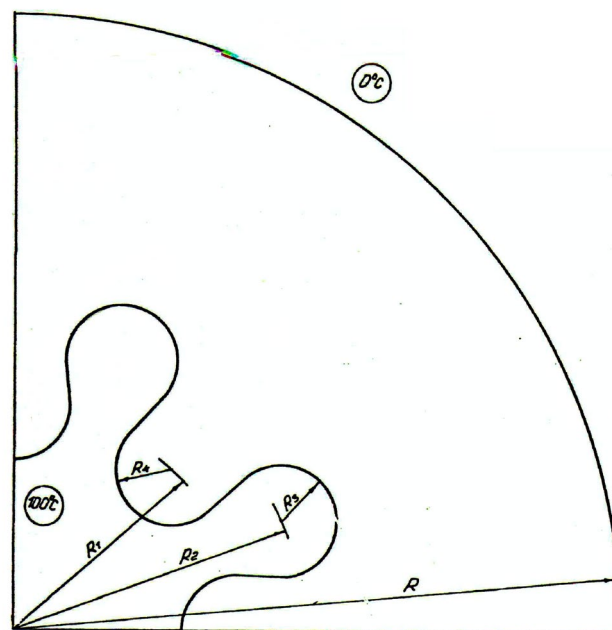


Рис. 1. Расчетная схема сосуда

$R=16,7$ м, $R_1=4,52$ м, $R_2=8,2$ м, $R_3=1,5$ м, $R_4=1,575$ м, $E=2,1 \times 10^5$ МПа, $\alpha=0,12 \times 10^{-4}$ 1/град, $\lambda=0,11$ ккал/см сек град, $\nu=0,27$

В результате решение задачи сводится к реализации системы сингулярных интегральных уравнений (СИУ).

$$\begin{aligned} v_i(x) + \frac{1}{2\pi(1-\nu)} \int_L \frac{1}{r} \langle v_j(y) [(1-2\nu) - 2\beta_j^2] \cos \psi + \\ + \{ [n_k(y)\beta_i - n_i(y)\beta_k] (1-2\nu) + \\ + 2\beta_i\beta_k \cos \psi \} v_k(y) \rangle dl_y = f_i(x_L) + f_i^T(x_L), \end{aligned} \quad (2)$$

где β_i, β_j – направляющие косинусы радиус-вектора $\vec{r}(x, y)$, n_j – направляющие косинусы к внешней нормали контура области, $\cos \psi = n_i(x) \cdot \beta_i$, ν – коэффициент Пуассона, $f_i^T = \sigma_{ij}^T \cdot n_j$ – фиктивная температурная поверхностная нагрузка, f_i – механическая нагрузка, $i, j = 1, 2$.

Напряжения определяем по формуле

$$\sigma_{ij}(x) = \sigma_{ij}^U(x) + \sigma_{ij}^T(x), \quad (3)$$

где σ_{ij}^U – напряжения, соответствующие задаче теории упругости;

σ_{ij}^T – интегральные формулы добавок температурных напряжений, т.е.