



НАПРУЖЕНО ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЕЛЕМЕНТА ЗАЛІЗОБЕТОННОГО ФУНДАМЕНТУ ПРИ НЕОДНОРІДНОМУ НАГРІВАННІ

Ю. Ю. Калмиков

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
вул. Державіна, 2, г. Макіївка, Україна.*

Отримана 28 січня 2007; прийнята 7 березня 2007.

Анотація. Представлені результати натурного експерименту з визначення температури зовнішніх та внутрішніх шарів нерівномірно нагрітої колонної частини залізобетонного фундаменту установки для охолодження заготовок сталеливарного виробництва при різних режимах технологічного нагріву, яка отримала пошкодження від сумісних силових та температурних впливів. На основі натурних вимірювань температури на поверхні колонної частини фундаменту виконані розрахунки температурних і вологісних полів, обумовлюючих неоднорідний розподіл фізико-механічних властивостей бетону, а також температурно-усадочних деформацій в перерізах елементу. Визначені зусилля в колонній частині фундаменту, які виникають від дії постійних та тимчасових навантажень. З використанням співвідношень розробленої у ДонНАБА ортотропної моделі деформування бетону виконана оцінка напружено-деформованого стану конструкції при нерівномірному нагріванні та дії силових факторів. Результати розрахунків напружень в бетоні та арматурі конструкції співставлені з пошкодженнями, що виявлені при обстеженні.

Ключові слова: колонна частина фундаменту, нерівномірний нагрів, поле температур, напружено-деформований стан (НДС), напруження, температурно-усадочні деформації.

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЭЛЕМЕНТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ФУНДАМЕНТА ПРИ НЕОДНОРОДНОМ НАГРЕВЕ

Ю. Ю. Калмыков

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
ул. Державина, 2, г. Макеевка, Украина.*

Получена 28 января 2007; принята 7 марта 2007.

Аннотация. Представлены результаты натурного эксперимента по определению температуры наружных и внутренних слоев неравномерно нагретой колонной части железобетонного фундамента установки для охлаждения заготовок сталелитейного производства при различных режимах технологического нагрева, получившей повреждения от совместных силовых и температурных воздействий. На основании натурных измерений температуры на поверхности колонной части фундамента выполнены расчеты температурных и влажностных полей, обуславливающих неоднородное распределение физико-механических свойств бетона, а также температурно-усадочных деформаций в сечениях элемента. Определены усилия в колонной части фундамента, возникающие от действия постоянных и временных нагрузок. С использованием соотношений разработанной в ДонНАСА ортотропной модели деформирования бетона выполнена оценка напряженно-деформированного состояния конструкции при неравномерном нагревании и действии силовых факторов. Результаты расчетов напряжений в бетоне и арматуре конструкции сопоставлены с повреждениями, выявленными при обследовании.

Ключевые слова: колонная часть фундамента, неравномерный нагрев, поле температур, напряженно-деформированное состояние (НДС), напряжения, температурно-усадочные деформации.

STRESSED-DEFORMED STATE OF A REINFORCED FOUNDATION ELEMENT AT UNEVEN HEATING

Yu. Yu. Kalmykov

*The Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavin Street, 86123, Makiyivka, Ukraine.*

Received 28 January 2007, accepted 7 March 2007.

Abstract. The are given the result of model experiment of determinig the temperature of external and internal layers of the unevenly heated column part of a ferroconcrete foundation for a plant to cool the steel-making bars at different modes of a technological heating, the plant having been damaged by joint force and temperature influences. The temperature on the surface of the column part of the foundation being measured, there were mode calculations of temperature and moisture patterns that condition both an uneven distribution of physico-mechanical properties of concrete and temperature-shrinkage deformations in element sections. There were determined the forces in the foundation column part arising under permanent and temporary loads. Using the correlations of the orthotropic model of concrete deformation developed in the DonNACEA, there was mode an estimation of a stressed-deformed state of the structure under an uneven heating and force factor influence. The results of calculating stresses in concrete and structure reinforcement are compared with damages revealed.

Keywords: column units of base, uneven heating, temperature field, stress-strain state, stresses, temperature-shrinkage deformations.

Введение

Напряженно-деформированное состояние железобетонных элементов с температурными и влажностными градиентами по сечению существенно зависит от температуры нагрева, величины и продолжительности действия температурно-влажностного перепада, распределения температурно-усадочных деформаций бетона [1, 2]. Перепад температуры по сечению элементов сооружений и неоднородность влажностных деформаций приводит к возникновению сложного объемного напряженного состояния, вызывает неоднородность прочностных и деформационных свойств бетона, обуславливает возникновение температурно-влажностных моментов, образование системы ортогональных трещин. НДС указанных железобетонных элементов в значительной степени определяется особенностями распределения по объему неоднородных влажностных деформаций, проявляющихся как на этапе твердения, так и в процессе эксплуатации конструкций.

С целью изучения условий эксплуатации элементов и численной оценки НДС конструкций, работающих в условиях неравномерного нагрева, было выполнено натурное исследование деформаций и распределения температуры в конструкциях столбчатых фундаментов холодильной установки машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) СП "Метален" (г. Енакиево) в ее различные технологические периоды эксплуатации. Необходимость выполнения указанных исследований обуславливалась выявлением причин образования и развития повреждений в колонных частях фундаментов силового характера, требующих разработки технических решений по их усилению.

Методика натурных и численных исследований НДС конструкций

Холодильная установка МНЛЗ является завершающим звеном в цикле производства стали и предназначена для естественного охлаждения перемещаемых при помощи опрокидывающих механиз-

мов стальных заготовок. Исследованные колонные части фундаментов из монолитного железобетона, расположенные в два ряда с шагом 5,75 м, выполняют функцию несущих конструкций для стальных балок опрокидывающих механизмов, совместно с которыми попарно образуют в продольном направлении расположения установки четырехпролетную раму с жесткой заделкой колонных участков фундаментов в фундаментной плите и шарнирным сопряжением со стальными балками механизмов опрокидывания. Геометрические размеры колонной части представлены на рис. 16. Согласно проектной документации при строительстве колонной части фундамента использовался жаростойкий бетон на шлаковом заполнителе класса по прочности В40, продольная арматура диаметрами 16 мм и 18 мм класса А500С, поперечная арматура диаметром 8 мм класса А240С.

Освидетельствование технического состояния конструкций выполнялось в период технологического перерыва в работе установки путем визуальных наблюдений с уровня верха фундаментной плиты. Для определения действительного распределения температуры нагрева бетона по объему конструкции при различных режимах эксплуатации, в период технологического перерыва в работе установки, в предварительно пробуренные отверстия в тело фундаментов в наружных слоях конструкции закладывались ХК-термопары. Схема

расположения отверстий для закладки термопар показана на рис. 16, где цифрами обозначены порядковые номера точек определения температуры.

Оценка НДС железобетонных колонных частей фундаментов, подвергающихся неравномерному нагреву, выполнялась в два этапа.

На первом этапе определялись усилия в конструкциях колонн при помощи программного комплекса "Лира-Windows" с учетом действительной расчетной схемы рамы от собственного веса конструкций холодильной установки и веса охлаждаемых заготовок. Действующие нагрузки на фундамент принимались по данным организации-проектировщика.

На втором этапе определялись распределение температур и влажности по сечению конструкции в период их возведения, а также температурно-усадочные деформации при их эксплуатации. Распределение температуры и влажности в рассматриваемых сечениях, а также температурно-усадочные деформации определялись согласно методикам [2, 3]. НДС конструкций фундаментов определялось для этапа возведения, на котором было определено исходное напряженное состояние, возникающее в результате проявления неравномерных усадочных деформаций по объему колонных частей, и для этапа эксплуатации с использованием данных натурных измерений температуры (рис. 2, 3б). Объемные деформации бетона

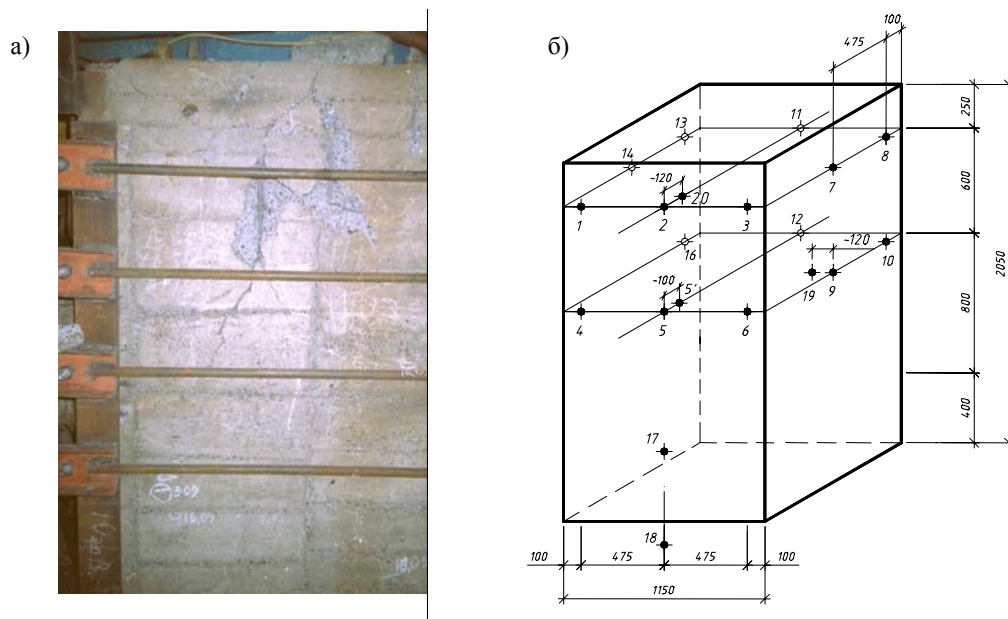


Рисунок 1. Повреждения конструкции столбчатого фундамента (а) и схема расположения ХК-термопар (б) МНЛЗ СП "Метален" г. Енакиеве

(усадочные и температурные) для периода возведения и эксплуатации, а также данные статического расчета конструкций являлись исходными данными для определения напряжений в бетоне и арматуре элемента.

Напряжения в бетоне и арматуре от неравномерного нагрева и действующих усилий определялись в соответствии с положениями монографии [1] на основе раздельного учета физической нелинейности и длительных процессов в бетоне, где выполнено построение физических соотношений для железобетонного элемента с неоднородными по объему свойствами, устанавливающих связь между внутренними усилиями и деформациями элемента относительно координатных осей (на уровнях координатных плоскостей) в виде:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ M_x \\ N_y \\ M_y \\ N_z \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \varepsilon_{0x} \\ \chi_x \\ \varepsilon_{0y} \\ \chi_y \\ \varepsilon_{0z} \\ \chi_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} N_{0x} \\ M_{0x} \\ N_{0y} \\ M_{0y} \\ N_{0z} \\ M_{0z} \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

где $N_x, N_y, N_z, M_x, M_y, M_z$ — продольные силы вдоль соответствующих координатных осей и изгибающие моменты относительно тех же осей;

$\varepsilon_{0x}, \varepsilon_{0y}, \varepsilon_{0z}, \chi_x, \chi_y, \chi_z$ — соответствующие линейные деформации элемента на уровне срединной координатной поверхности и кривизны.

Dij — жесткостные коэффициенты, определяемые согласно [1] выражениями типа:

$$D_{11} = \int_{-b/2}^{+b/2} \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E_1 \cdot (1 - \mu_{23} \cdot \mu_{32})}{\Omega} \cdot dy \cdot dz + \sum_{m_{sx}=1}^{m_{sx}} E_{s,mx}^* \cdot A_{s,mx} ; \quad (1.2)$$

$$D_{12} = \int_{-b/2}^{+b/2} \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E_1 \cdot [(\mu_{12} + \mu_{13} \cdot \mu_{32}) \cdot \mathfrak{I}_{k,x} + (\mu_{13} + \mu_{12} \cdot \mu_{23}) \cdot \mathfrak{I}_{j,x}]}{\Omega} \cdot dy \cdot dz . \quad (1.3)$$

Элементы вектора-столбца свободных членов представляются выражениями типа:

$$\begin{aligned} N_{0x} = & - \int_{-b/2}^{+b/2} \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E_1 \cdot dy \cdot dz}{\Omega} \cdot [(1 - \mu_{23} \cdot \mu_{32}) \cdot \Delta \varepsilon_1 + (\mu_{12} + \mu_{13} \cdot \mu_{32}) \cdot \Delta \varepsilon_2 + \\ & + (\mu_{13} + \mu_{12} \cdot \mu_{23}) \cdot \Delta \varepsilon_3] - \sum_{m_{sx}=1}^{m_{sx}} A_{s,mx} \cdot E_{s,mx}^* \cdot (\alpha_{st,mx} \cdot \Delta t_{mx} + \Delta \varepsilon_{st,mx}) ; \end{aligned} \quad (1.4)$$

$$\begin{aligned} M_{0x} = & - \left[\int_{-a/2}^{+a/2} \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E_2 \cdot dx \cdot dz \cdot \mathfrak{I}_{k,x}}{\Omega} \cdot (\mu_{21} + \mu_{31} \cdot \mu_{23}) \cdot \Delta \varepsilon_1 + \int_{-a/2}^{+a/2} \int_{-b/2}^{+b/2} \frac{E_3 \cdot dx \cdot dy \cdot \mathfrak{I}_{j,x}}{\Omega} \cdot (\mu_{31} + \mu_{32} \cdot \mu_{21}) \cdot \Delta \varepsilon_1 + \right. \\ & + \int_{-a/2}^{+a/2} \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E_2 \cdot dx \cdot dz \cdot \mathfrak{I}_{k,x}}{\Omega} \cdot (1 - \mu_{31} \cdot \mu_{13}) \cdot \Delta \varepsilon_2 + \int_{-a/2}^{+a/2} \int_{-b/2}^{+b/2} \frac{E_3 \cdot dx \cdot dy \cdot \mathfrak{I}_{j,x}}{\Omega} \cdot (\mu_{32} + \mu_{12} \cdot \mu_{31}) \cdot \Delta \varepsilon_2 + \\ & + \int_{-a/2}^{+a/2} \int_{-h/2}^{+h/2} \frac{E_2 \cdot dx \cdot dz \cdot \mathfrak{I}_{k,x}}{\Omega} \cdot (\mu_{23} + \mu_{13} \cdot \mu_{21}) \cdot \Delta \varepsilon_3 + \int_{-a/2}^{+a/2} \int_{-b/2}^{+b/2} \frac{E_3 \cdot dx \cdot dy \cdot \mathfrak{I}_{j,x}}{\Omega} \cdot (1 - \mu_{12} \cdot \mu_{21}) \cdot \Delta \varepsilon_3 + \\ & \left. + \sum_{m_{sy}=1}^{m_{sy}} E_{s,my}^* \cdot A_{s,my} \cdot \mathfrak{I}_{sy,x} \cdot (\alpha_{st,my} \cdot \Delta t_{my} + \Delta \varepsilon_{st,my}) + \sum_{m_{sz}=1}^{m_{sz}} E_{s,mz}^* \cdot A_{s,mz} \cdot \mathfrak{I}_{sz,x} \cdot (\alpha_{st,mz} \cdot \Delta t_{mz} + \Delta \varepsilon_{st,mz}) \right] . \end{aligned} \quad (1.5)$$

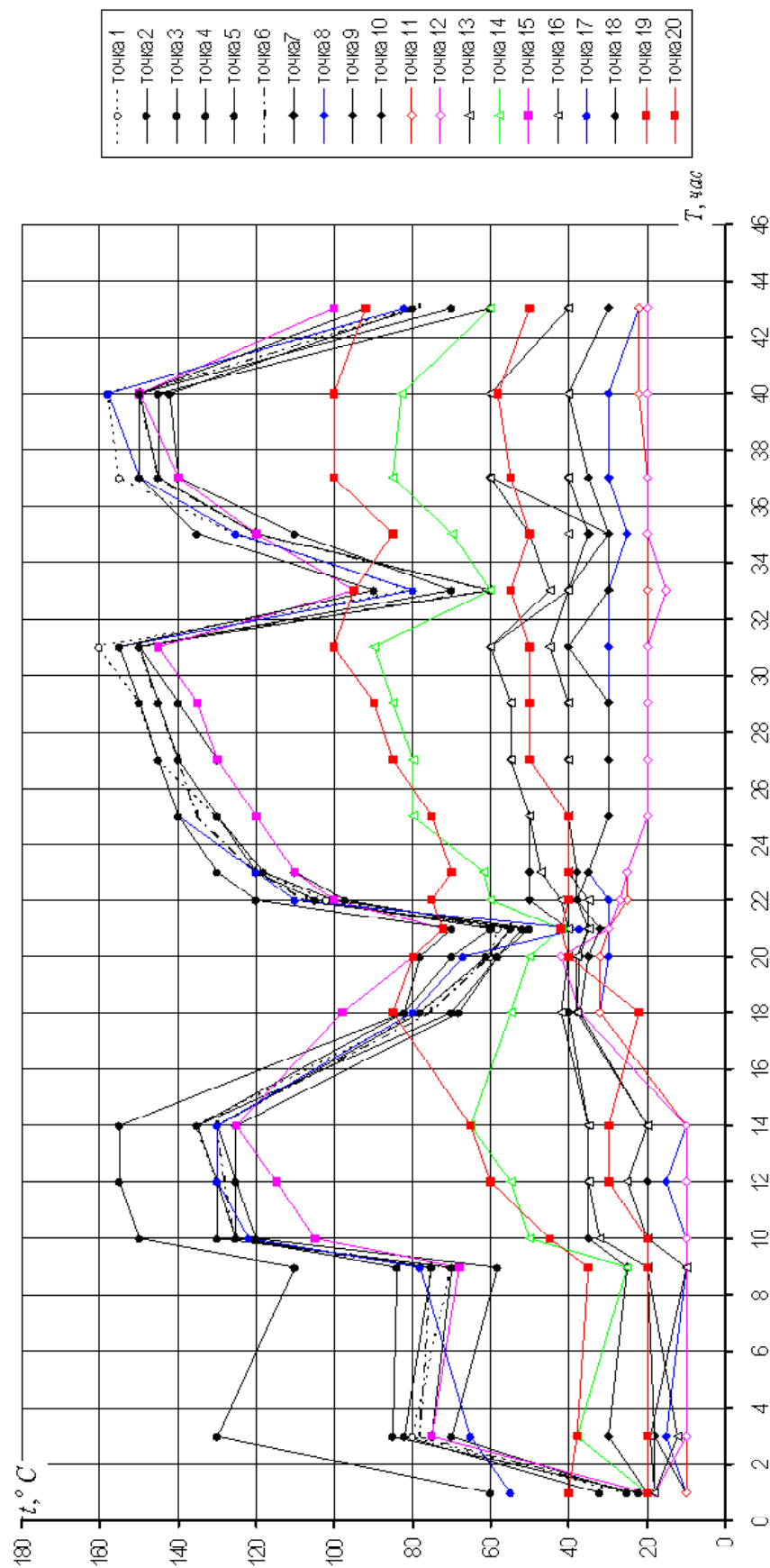


Рисунок 2. Изменения температуры в поверхностных слоях бетона колонной части фундамента в различные периоды эксплуатации холодильной установки

Соотношения (1.1) получены из условия статической эквивалентности внешних сил и внутренних напряжений в бетоне и арматуре при использовании гипотезы о недеформируемости нормалей. Модель бетона принята в виде модели ортотропного тела [1], ортотропные свойства которого обусловлены ортогональной схемой образования трещин и направленным развитием эффектов дилатации и сжимаемости. В расчетах НДС использовались предложения [4] по учету изменения физико-механических свойств бетона (призменной прочности, предельной сжимаемости и начального модуля упругости) в зависимости от массивности, условий твердения и температуры бетона в теле конструкции.

Численная оценка НДС конструкции столба с неоднородными по объему свойствами с учетом физической нелинейности деформирования выполнялась с использованием разработанной в среде Visual Basic for Applications программы для ПЭВМ.

Результаты исследований

Результаты натурных исследований показали, что конструкции фундаментов за период эксплуатации приобрели существенные повреждения в виде системы вертикальных трещин со скалыванием поверхностных слоев бетона (рис. 1а), а наружные грани колонных частей фундаментов подвержены неравномерному нагреву, при этом различие в температурах нагрева противоположных граней в период эксплуатации может достигать 120°C (рис. 2, 3б, 3г). Направление теплового потока не совпадает с направлениями главных осей сечения, что является причиной возникновения неоднородного по сечению элемента распределения физико-механических свойств и температурно-усадочных деформаций бетона (рис. 3г). Конструкции столбов испытывают с учетом действия усилий от внешних нагрузок при этом сложную форму напряженного состояния - косое внецентренное сжатие.

Результаты расчетов НДС конструкции свидетельствуют о том, что неоднородное по объему конструкции распределение усадочных деформаций бетона, развивающихся в доэксплуатационный период, дополненное неоднород-

ными дополнительными деформациями усадки в условиях нагрева (рис. 3в), обуславливает возникновение значительных по величине растягивающих напряжений в наружных слоях конструкции и, как следствие, образование со стороны наружных граней системы вертикальных и горизонтальных трещин глубиной до 8 мм и сжимающих напряжений до 13 МПа в стержнях вертикальной арматуры и до 18 МПа в стержнях поперечной арматуры. После образования трещин в доэксплуатационный период сжимающие напряжения во внутренних объемах конструкции резко снижаются до значений порядка $0,02 R_b$ (рис. 3д).

Величина продольной силы и изгибающего момента в плоскости расположения балок опрокидывающего устройства, полученные из статического расчета четырехпролетной рамы, составили $N_z = 1,123\text{МН}$ и $M_x = 0,008\text{МН м}$

Неравномерный нагрев конструкции в период эксплуатации установки, характеризующийся проявлением неоднородных температурно-усадочных деформаций в бетоне в сочетании с внешней нагрузкой, приводит к дополнительному увеличению глубины развития трещин до 12 мм растянутых зон, увеличению до 58 МПа сжимающих напряжений в продольной арматуре и до 172 МПа в арматуре более нагретых граней, разрушению бетона более нагретых граней от действия сжимающих напряжений. Для части сечения конструкции, где влияние температуры на снижение прочностных и деформационных характеристик бетона незначительно, сжимающие напряжения в бетоне не превышают величины $0,31 R_b$.

Разрушения бетона конструкции, выявленные при обследовании, расположены у наиболее нагретых граней, что подтверждают результаты расчетов НДС.

Выводы

1. Выполненные расчеты НДС конструкций колонной части холодильной установки МНЛЗ, эксплуатирующихся в условиях неравномерного нагрева по своему характеру является объемным. Причем неоднородное НДС по объему конструкции возникает в доэксплуатационный период.

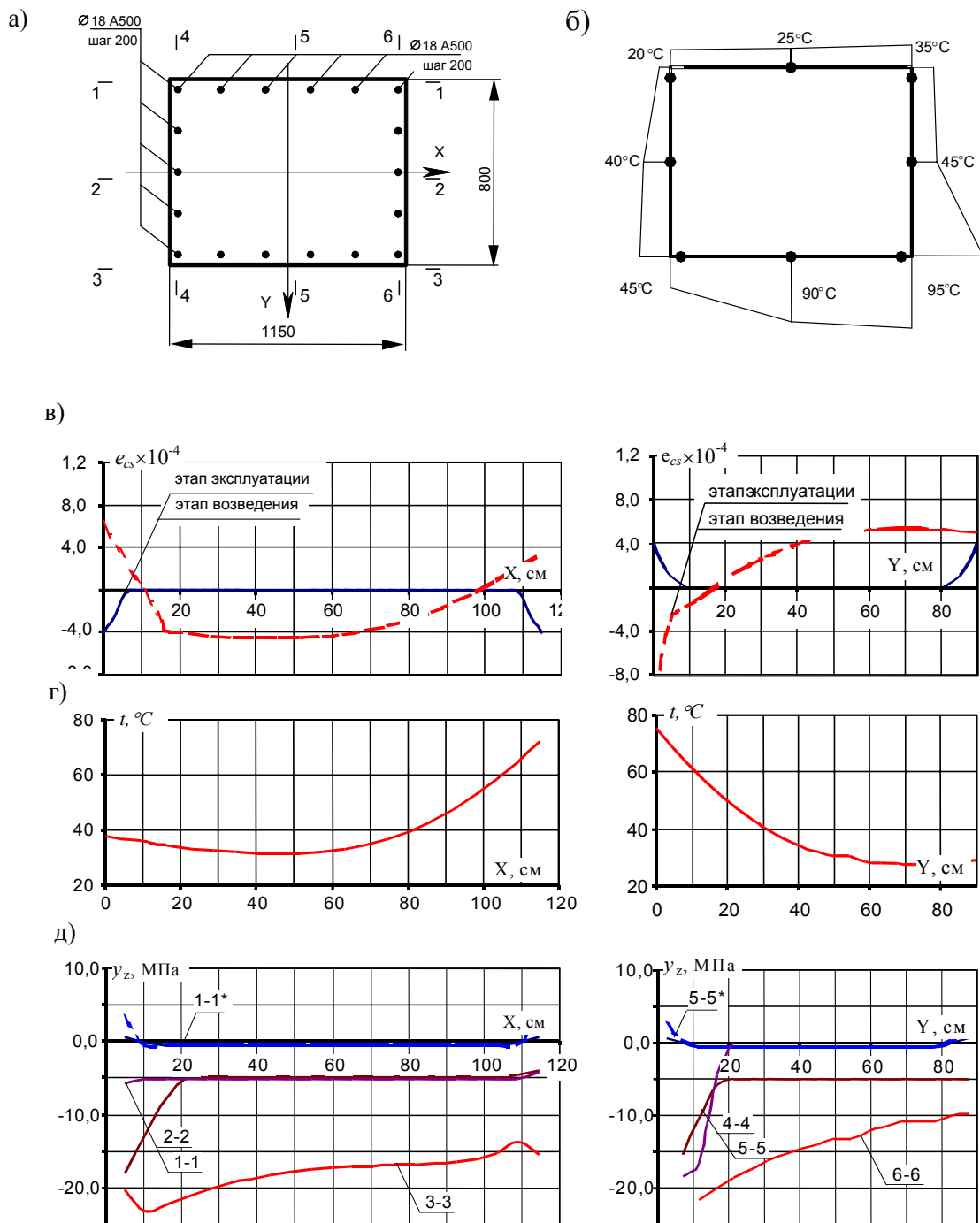


Рисунок 3. Схема армирования (а), распределение температуры бетона по сечению для расчетного случая (б, г), деформаций усадки (в) и напряжений (д) в сечениях (а) конструкции колонной части фундамента МНЛЗ

2. Характер повреждений, выявленный в процессе обследования конструкций частей фундаментов, в целом, соответствует выявленным в расчетах особенностям их НДС.
3. Проектирование элементов конструкций, эксплуатирующихся в условиях повышенных температур, должно вестись с учетом случаев неравномерного нагрева при несопадении направления теплового потока с главными осями сечения конструкций.

Литература

1. Корсун В.И. Напряженно-деформированное состояние железобетонных конструкций в услови-

- ях температурных воздействий. - Макеевка: ДонГАСА. - 2003. - 194 с.
2. Кричевский А.П. Расчет железобетонных инженерных сооружений на температурные воздействия. - М.: Стройиздат, 1984. - 148с.
3. Фомин С.Л. Расчет железобетонных конструкций на температурно-влажностные воздействия технологической и климатической среды. - Киев, УМКВО, 1992.
4. Калмыков Ю.Ю. Объемное напряженно-деформированное состояние стержневых железобетонных элементов в условиях однократного нагрева до +150 С: Автореф. дисс... канд. техн. наук: 05.23.01. - Макеевка: ДонГАСА., 2004.-20 с.

Калмыков Юрий Юрьевич, доцент кафедры "Железобетонные конструкции", гл. инженер СНПЦ "Специальные и высотные инженерные сооружения". Научные интересы: усовершенствование методов оценки напряженно-деформированного состояния элементов железобетонных конструкций зданий и сооружений, работающих в условиях сложных силовых и температурно-влажностных воздействий. E-mail: - u2kalmikow@rambler.ru

Калмыков Юрій Юрійович, доцент кафедри "Залізобетонні конструкції", гол. інженер СНВЦ "Спеціальні і висотні інженерні споруди". Наукові інтереси: удосконалення методів оцінки напружено-деформованого стану елементів залізобетонних конструкцій будівель та споруд, що працюють в умовах складних та температурно-вологісних впливів. E-mail: - u2kalmikow@rambler.ru

Kalmykov Yuriy Yuriyovich, as Associated Professor at the Department "Reinforced Structures", chief engineer of the Center "Special and High Engineering Structures". His scientific interests are: imperfection of the methods of estimating a stressed-deformed state of elements of reinforced frames of structures and buildings operating under complex force and temperature-humidity actions. E-mail: - u2kalmikow@rambler.ru