

УДК 624.012:53.09

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.162.2016.78287>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАГМЕНТОВ МОНОЛИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ФУНДАМЕНТОВ КОКСОВЫХ БАТАРЕЙ

Д-р техн. наук С. Л. Фомин, соискатель А. М. Кравченко

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФРАГМЕНТІВ МОНОЛІТНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ФУНДАМЕНТІВ КОКСОВИХ БАТАРЕЙ

Д-р техн. наук С. Л. Фомін, здобувач О. М. Кравченко

## EXPERIMENTAL STUDY OF MONOLITHIC REINFORCED CONCRETE FOUNDATION FRAGMENTS OF COKE OVEN BATTERIES

Dr. Sciences S. Fomin, applicant A. Kravchenko

*Разработана методика проведения экспериментальных исследований железобетонных фрагментов фундаментов коксовых батарей с боковым подводом отопительного газа при статической нагрузке и нагревании. Разработана и выполнена новая установка для проведения огневых испытаний, опытные образцы, моделирующие фрагменты фундамента в натуральную величину. Проведены экспериментальные исследования, получены новые сведения о работе железобетонных конструкций, что позволило усовершенствовать характер армирования, доказать целесообразность конструктивных решений фундаментов из жаростойкого бетона без футеровки бортов.*

**Ключевые слова:** лабораторные экспериментальные исследования, фундаменты коксовых батарей, новая испытательная установка, учет температурных воздействий.

*Розроблено методіку проведення експериментальних досліджень залізобетонних фрагментів фундаментів коксових батарей з бічним підведенням опалювального газу при статичному завантаженні і нагріванні. Розроблено та виконано нову установку для проведення вогневих випробувань, дослідні зразки, що моделюють фрагменти фундаменту в натуральну величину. Проведено експериментальні дослідження, отримано нові відомості про роботу залізобетонних конструкцій, що дозволило удосконалити характер армування, довести доцільність конструктивних рішень фундаментів з жаростійкого бетону без футерування бортов.*

**Ключові слова:** лабораторні експериментальні дослідження, фундаменти коксових батарей, нова випробувальна установка, облік температурних впливів.

*A methodology for experimental studies of reinforced concrete foundations fragments of coke oven batteries with gun flue of heating gas under static load and heating was developed. A new system for conducting fire tests, prototypes that model fragments of a full-size foundation was developed and implemented. Experimental studies were done, new information was obtained about the operation of reinforced concrete foundation structures of coke oven batteries. Existence of stretching in the lower parts of the arched bridges and compressive stresses in the upper parts was experimentally proven. This effect was found during numerical simulation with the frame arrangement in all 5 spans as well as in calculations using flat and three-dimensional model. In the first and second fragments of the foundation through cracks appeared in the bottom part of reinforced concrete flue fragment. This fact allowed to improve the pattern of reinforcement, to*

*prove the feasibility of design solutions of heat-resistant concrete foundations without lining of flues.*

**Keywords:** *Laboratory experimental studies, foundations of coke oven batteries, new test facility, effects of temperature.*

**Вступление.** Коксовой батареей называется группа коксовых печей, объединенных общим фундаментом, устройствами подведения отопительных газов и воздуха, отвода продуктов сгорания и коксования. Коксовая батарея сооружается на железобетонном фундаменте. В печах с боковым подводом отопительного газа на нижней плите фундамента расположены каналы для отвода продуктов сгорания - борова и вентиляционный канал в центре, которые объединены несущим железобетонным массивом для восприятия нагрузок от кладки батареи.

Актуальность научных разработок по проблеме обусловлена необходимостью совершенствования конструктивных решений фундаментов коксовых батарей с боковым подводом отопительного газа.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Технические тенденции в перепроектировании и строительстве коксовых батарей изложены в [1], нелинейная модель ввода-вывода для коксовой батареи в [2], анализ переноса тепла в фундаментах проведен в [3], расчет потерь тепла фундаментной плиты при неравномерных температурных профилях внутренней температуры в [4]. Продлению срока службы коксовых батарей посвящена работа [5], прочности жаростойкого бетона на сжатие при нагреве, кубиковой и призмной прочности бетона при повышенных температурах – работы [6-8].

Разработанная модернизированная конечно-элементная рамная модель расчета фундаментов, состоящая из отдельных конечных стержневых элементов различной высоты, показала свою эффективность по сравнению с традиционной рамной системой [9]. Новая расчетная модель увеличила надежность конструкции

фундамента за счет приближения к действительной плоской аточной системе, однако остался нерешенным ряд вопросов, связанных с упрощающими предпосылками рамной схемы.

Проведен комплекс численных экспериментов напряженно-деформированного состояния фундаментов при совместном воздействии температуры и нагрузки при плоском и объемном напряженном состоянии. Выявлены особенности работы фундаментов, разработаны расчетные модели, рекомендации по совершенствованию конструктивных решений и армированию их элементов. Для проверки полученных результатов и выявления особенностей напряженно-деформированного состояния проведены экспериментальные исследования.

**Определение цели и задачи исследования.** Цель экспериментальных исследований – выявление особенностей работы фрагментов монолитных железобетонных фундаментов коксовых батарей с боковым подводом отопительного газа, подтверждение разработанной методики их расчета.

Задачами экспериментов являлись:

- разработка экспериментальной модели фрагмента фундамента коксовых батарей;
- исследование прочностных и деформационных характеристик примененного жаростойкого бетона;
- разработка и изготовление установки для испытания железобетонных фрагментов фундамента при воздействии температуры и нагрузки;
- определение двумерных температурных полей в элементах образцов;
- определение характера деформирования железобетонных конструкций

фундамента при одновременном воздействии температуры и нагрузки;

– определение диаграммы  $\sigma_c - \epsilon_c$  жаростойкого сжатого бетона в зависимости от температуры нагрева;

– выявление влияния температурных моментов на перераспределение усилий;

– определение характера образования и развития деформаций в сечениях фундамента в процессе нагревания и трещинообразования;

– определение особенностей напряженно-деформированного состояния при наличии и отсутствии футеровки бортов.

Проведенное исследование распределения температуры в конструкциях фундаментов коксовых батарей с боковым подводом отопительного газа и воздуха в сечении фундамента коксовой батареи без футеровки и с футеровкой свидетельствует о возможности, с теплотехнической точки зрения, применения в борове для отвода продуктов горения жаростойкого бетона без применения футеровки. Моделирование напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций фундамента без футеровки, с футеровкой из шамотной кладки ( $\lambda=0.6$  Вт/м·К) и с футеровкой из теплоизоляционного гипотетического материала ( $\lambda=0.03$  Вт/м·К) подтверждает выводы теплотехнической части исследований о целесообразности применения жаростойкого бетона без футеровки.

#### **Основная часть исследования.**

Проведены лабораторные экспериментальные исследования двух фрагментов коксовых батарей в натуральную величину: фрагмента №1 в виде борова с футеровкой шамотным кирпичом, фрагмента №2 – без футеровки. Высота фрагментов равнялась 2180 мм, ширина 2940 мм, толщина 250 мм; ширина колонн фрагмента №1 составляла 500 мм (250 мм из бетона плюс 250 мм из шамотного кирпича). Высота сечения железобетонной арки в коньке составляла 250 мм – для фрагмента №1 и 500 мм для фрагмента №2. Радиус арки у фрагмента

№1 (с учетом футеровки) и у фрагмента №2  $R = 970$  мм. Бетон принят жаростойкий класса С25 по прочности на сжатие, класса 7 (700 °С) по предельно допустимой температуре применения. Состав на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси: портландцемент П/ц – 400-350 кг; тонкомолотая добавка из боя обыкновенного глиняного кирпича – 120 кг; заполнитель базальтовый: крупный – 950 кг, мелкий – 850 кг.

Армирование верхней части фрагмента №1 высотой 250 мм производилось стальным каркасом с верхней арматурой 2Ø16 А400, нижней 2Ø16 А400. Армирование боковых частей, прилегающих к наружным поверхностям, осуществлялось снизу на высоту 710 мм стальными каркасами с установкой по углам арматуры 4Ø16 А400 в пределах бетонного сечения размерами 250х250 мм. Внутренняя поверхность арки окаймлялась арматурной сеткой из 2Ø16 А400. Установлена также арматура раскрепления вутов – верхних угловых бетонных массивов 4Ø16 А400.

Армирование фрагмента №2 проведено аналогично, с той лишь разницей, что верхняя часть имела высоту 500 мм, а бетонное сечение нижней части составляло 500х250 мм.

Бетонирование проведено в горизонтальном положении, после которого в семи сечениях расставлены 45 каналообразователей для дальнейшей зачеканки термопар. Изготовлены также кубы и призмы для определения физико-механических характеристик бетона. Результаты исследования прочностных и деформационных свойств бетонов исследованы в работе [10].

**Установка для испытания фрагментов железобетонных фундаментов при статической нагрузке и нагреве.** Разработана и изготовлена установка для испытания железобетонных фрагментов коксовых батарей в виде бортов (фрагмента №1 с футеровкой шамотным кирпичом и фрагмента №2 – без футеровки).

Установка для испытания железобетонных фундаментов коксовых батарей на прочность и деформативность при статической нагрузке и нагревании содержит образец, выполненный в виде монолитного железобетонного фрагмента плоской плиты высотой 2180 мм, шириной 2940 мм, толщиной 250 мм, которая прорезана бором с цилиндрическим сводом высотой 1680 мм, шириной 1940 мм. Образец закрепляется снизу в

силовой пол испытательного зала с помощью болтов и стальных закладных деталей.

Сверху и с торцов образец обрамляет П-образная силовая металлическая рама для создания вертикальной нагрузки (рис. 1), в нижней части проема бора размещается электрический нагреватель. По данным Гипрококса, температура отработанных газов в борове составляет 360-400 °С.



Рис. 1. Фрагмент №1 в виде бора с футеровкой шамотным кирпичом и силовая металлическая рама для создания вертикальной нагрузки

Для создания двумерного температурного поля в образце выполнены раздвижные рамы с теплоизолятором жаростойкими матами из минеральной ваты Рагос, которые при исследовании влияния нагрева или при совместном воздействии температуры и нагрузки плотно придвигаются к задней и передней поверхностям образца, препятствуя образованию тепловых потоков по толщине образца (рис. 2).

**Проведение испытания образцов-фрагментов фундаментов коксовых батарей. Железобетонный фрагмент**

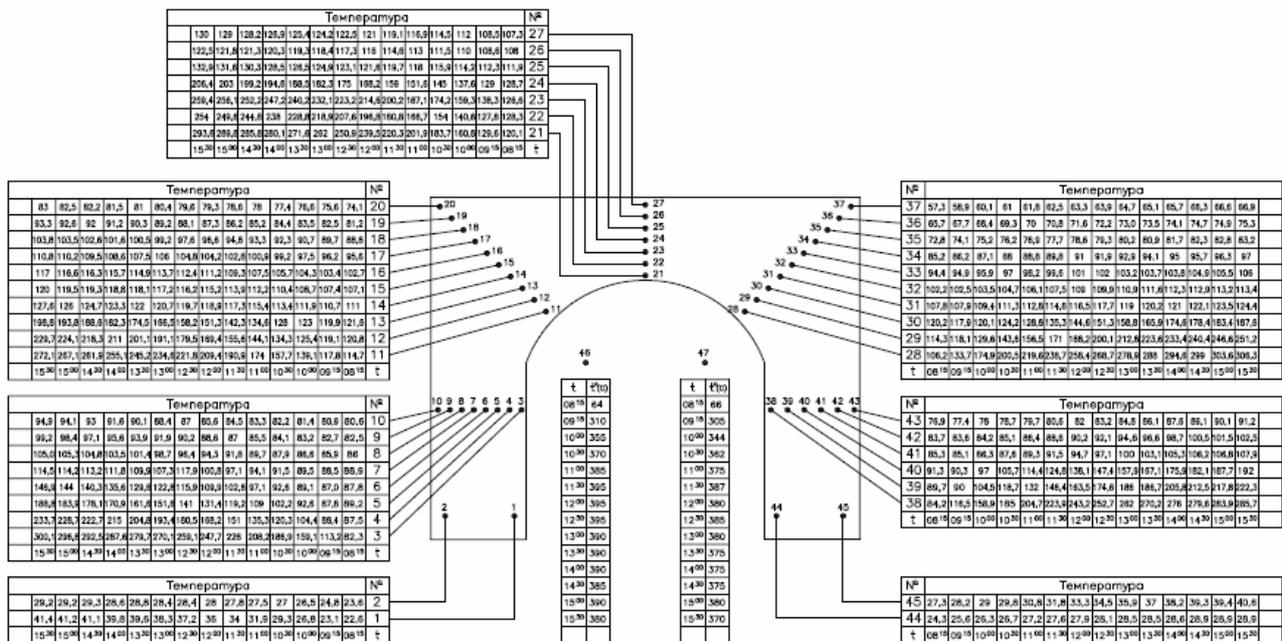
**фундамента №1 с футеровкой бора.** Для ввода коксовых батарей в эксплуатацию предусмотрена процедура сушки кладки коксовых печей и фундаментов. При проведении эксперимента на двух моделях фрагментов фундаментов также проводилась их сушка. При этом до установки измерительных приборов проводилась теплоизоляция образцов, включались электрические нагреватели и проводилась сушка образцов с соблюдением скорости нагрева 150 °С/ч до заданной температуры не выше 300 °С. При этом фиксировались температуры по

45 термопарам, установленим по середині товщини залізобетонної плити, і по 2 термопарам в повітряному просторі бору. Розміщення термопар і результати

розподілення температури для одного з варіантів температурних впливів показані на рис. 3.



Рис. 2. Роздвіжні рами з теплоізолятором - матами з мінеральної вати для створення двовимірного температурного поля в образці



Для испытания статической нагрузкой после нагрева снималась раздвижная рама с утеплителем передней поверхности образца, расставлялись измерительные приборы по схеме (рис. 4), домкраты с

распределительными траверсами на верхнюю поверхность образца и прикладывалась нагрузка путем закачивания масла в домкраты с помощью насосной станции.

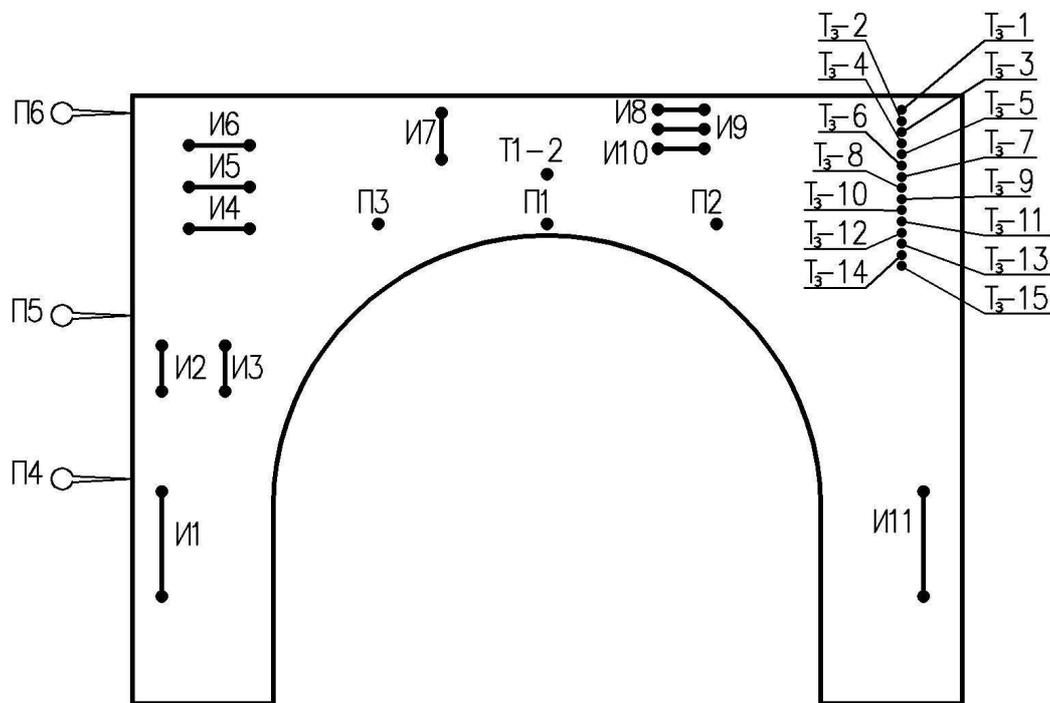


Рис. 4. Схема расстановки индикаторных тензодатчиков И1-И11 на бетон, рычажных тензодатчиков Т1-Т2 на верхней и нижней арматуре, тензодатчиков Тз\_1- Тз\_15 на бетон и прогибомеров П1-П6 в фрагменте фундамента №1

Нагрузка прикладывается пошагово по 1,5 т/п.м до максимально заданного уровня 13,5 т/п.м (рис. 5), что соответствует заданию Гипрококса. На каждом шаге замерялись относительные деформации по всем тензодатчикам и перемещения по прогибомерам. При нагрузке 12 т/п.м была зафиксирована трещина посередине арки бруса, которая перерезала футеровку и дошла до половины железобетонной части (верхний рычажный тензодатчик Т2 на базе 50 мм показал деформации сжатия  $\epsilon_c = 0,0006$ ; нижний тензодатчик Т1, который стоял на арматуре вблизи границы с футеровкой, по-

казал деформации растяжения  $\epsilon_c = 0,001$ ). На рис. 7 показан общий вид трещины.

Верхняя часть образца прогнулась вниз (П1=0,85 мм, П2=0,64 мм, П3=0,56 мм) при нагрузке 12 т/п.м и при максимальной нагрузке 13,5 т/п.м – (П1 = 1 мм, П2 = 0,79 мм, П3 = 0,64 мм). Боковые прогибомеры показали при нагрузке 12 т/п.м - (П4 = 0,11 мм, П5 = -0,04 мм, П5 = -1,32 мм); при максимальной нагрузке 13,5 т/п.м - (П4 = 0,13 мм, П5 = -0,03 мм, П5 = -1,36 мм).

Тензорезисторы (рис. 6) показали очень малые деформации, однако, можно было выявить положительные и отрицательные значения (Тз1-Тз5 +), (Тз6-Тз11 -), (Тз12-Тз15 ±).



Рис. 5. Загрузка фрагмента фундамента №1 с футеровкой борова



Рис. 6. Комплект тензостанции

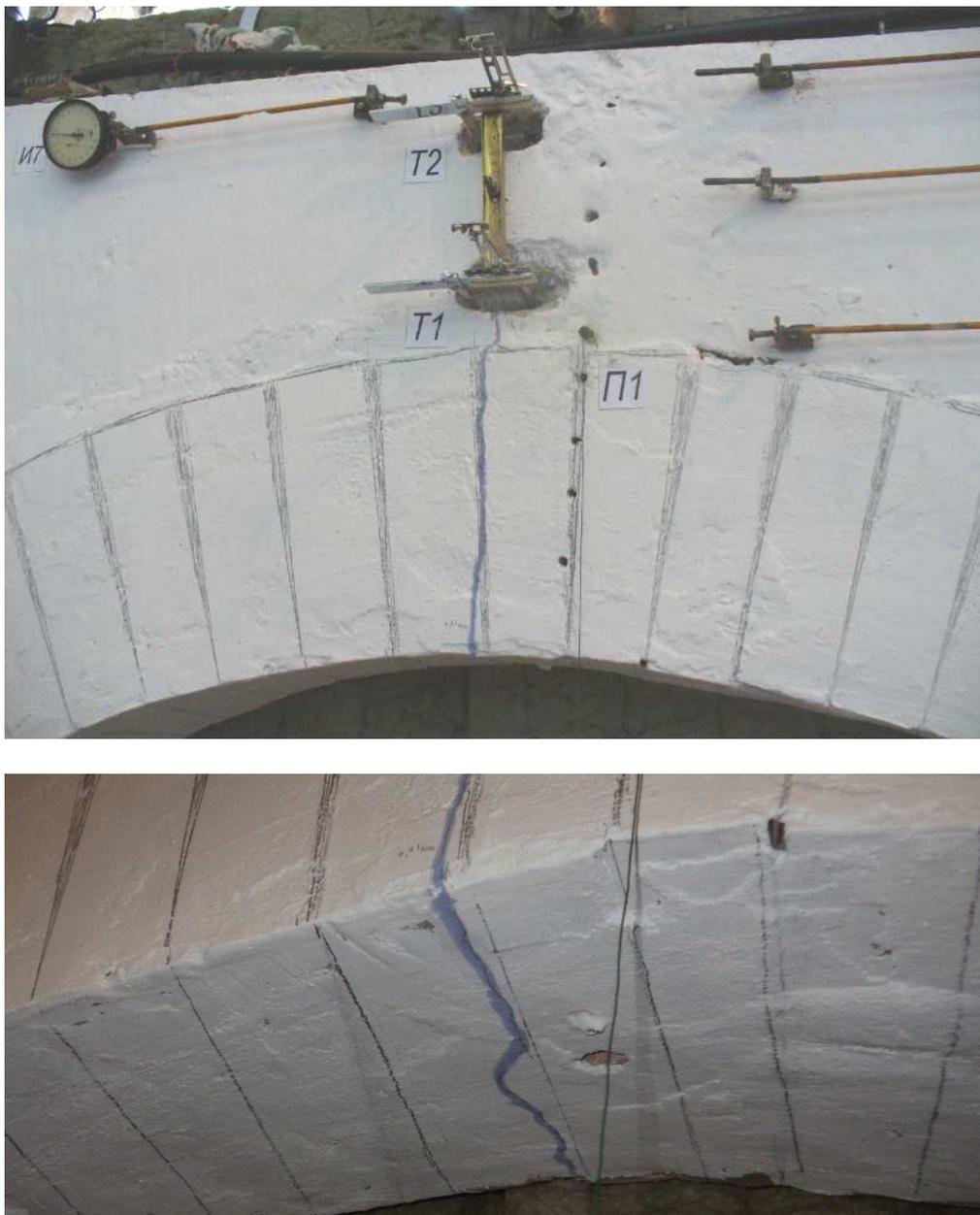


Рис. 7. Установка рычажных тензометров Т1 и Т2 и появление трещины в нижней части фрагмента железобетонного борава №1 и в футеровке

**Железобетонный фрагмент фундамента №2 без футеровки борава.** Результаты проведенных исследований железобетонного фрагмента фундамента №1 с футеровкой борава позволили упростить исследования фрагмента фундамента №2 без футеровки. Уменьшили количество индикаторных тензометров до

пяти И1-И5, отменили тензодатчики, без изменения оставили рычажные тензометры Т1 и Т2 на верхней и нижней арматуры (рис. 9) и прогибомеры П1-П6 в железобетонном фрагменте.

Схема расстановки измерительных приборов показана на рис. 8.



Рис. 8. Расстановка индикаторных тензометров И1-И5 на бетон, рычажных тензометров Т1-Т2 на верхней и нижней арматуре и прогибомеров П1-П6 в железобетонном фрагменте фундамента №2 без футеровки борава



Рис. 9. Установка рычажных тензометров Т1-Т2 на верхней и нижней арматуре

Как и для фрагмента фундамента №1 с футеровкой бора нагрузка прикладывалась пошагово 1,5 т/п.м до максимально заданной 13,5 т/п.м. На каждом шаге измерялись относительные деформации по всем тензOMETрам и перемещения по прогибомерам.

При нагрузке 6 т/п.м появились радиальные волосяные трещины, которые показаны на рис. 10 и схеме на рис. 11. Ширина раскрытия трещин не превысила 0.1 мм.



Рис. 10. Появление трещин на нижнем контуре арочного свода бора

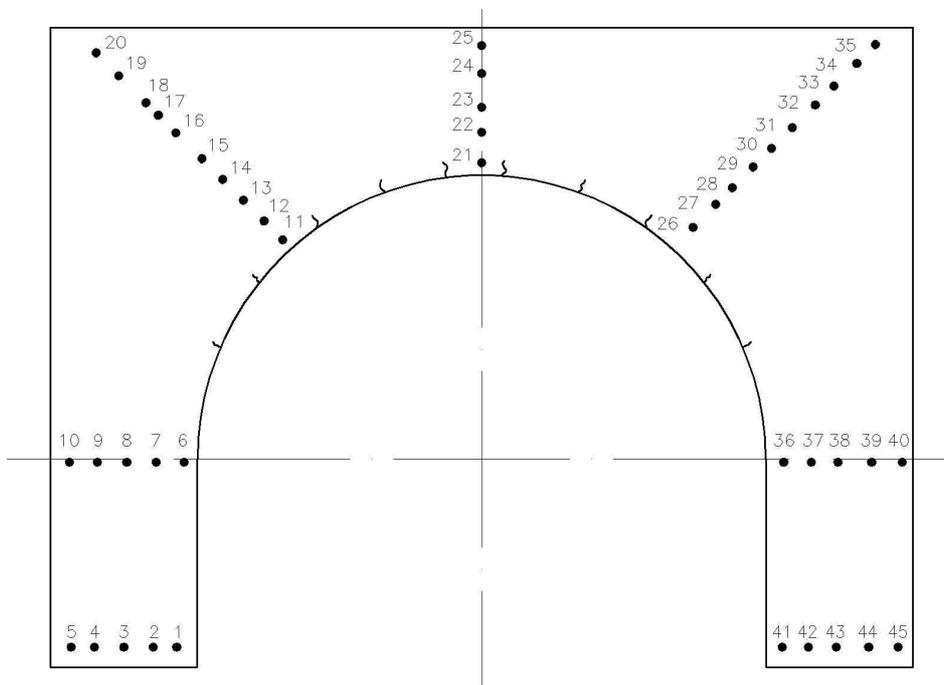


Рис. 11. Схема трещин на нижнем контуре арочного свода бора

При нагрузке 13,5 т/п.м была зафиксирована трещина посередине арки борова, которая дошла до 50 мм железобетонной части (верхний рычажный тензометр T2 на базе 50 мм показал деформации сжатия  $\epsilon_c = 0,003$ ; нижний T1, который стоял на арматуре вблизи внутренней границы борова, показал деформации растяжения  $\epsilon_c = -0,0002$ ).

Верхняя часть образцов прогнулась вниз (П1 = 0,59 мм, П2 = 0,38 мм, П3 = 1,71 мм) при максимальной нагрузке 13,5 т/п.м. Боковые прогибомеры показали при максимальной нагрузке 13,5 т/п.м – (П4 = 0,02 мм, П5 = 0,0023 мм, П5 = 0,0022 мм).

Результаты измерений деформаций по индикаторным тензограмм показали очень малые деформации, однако можно было выявить положительные и отрицательные значения: (И1 +), (И2 = 0), (И3 -), (И4 = 0), (И5 ±).

**Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении**

1. Разработана методика проведения экспериментальных исследований железобетонных фрагментов фундаментов коксовых батарей с боковым подводом отопительного газа при статической загрузке и нагревании.

2. Разработана и выполнена новая установка для проведения огневых испытаний, опытные образцы, моделирующие фрагменты фундамента в натуральную величину.

3. Полученные результаты экспериментальных исследований выявили ряд новых особенностей работы железобетонных конструкций.

Экспериментально доказан факт наличия в нижних частях арочных перемычек растягивающих, а в верхних – сжимающих напряжений. Этот эффект был обнаружен при численном моделировании с применением рамной схемы во всех пяти пролетах, а также при расчетах с применением плоской и объемной модели. В первом и во втором фрагментах фундамента появлялись сквозные трещины в нижней части фрагмента железобетонного борова.

Это позволило усовершенствовать характер армирования, доказать целесообразность конструктивных решений фундаментов из жаростойкого бетона без футеровки борозов [11].

4. Разработаны и внедрены эффективные конструктивные решения фундаментов коксовых батарей с боковым подводом отопительного газа.

#### *Список использованных источников*

1. 98/03564 Technical trends in the redesign and construction of coke oven batteries and units for dry quenching of coke. Fuel and Energy Abstracts. – September 1998. – Volume 39, Issue 5. – Page 336.
2. Input-output nonlinear model of a coke oven battery. Control Applications of Nonlinear Programming and Optimization / C. Bénard, S. Berekdar, C. Duhamel, M.-M. Rosset. – 1989, 1990. – Pages 95-99.
3. CFD analysis of the thermal behaviour of heating walls in a coke oven battery. International Journal of Thermal Sciences / Jacek Smolka, Lukasz Slupik, Adam Fic, Andrzej J. Nowak, Ludwik Kosyrzyk. – June 2015. – Volume 104. – Pages 186-193.
4. Slab heat loss calculation with non-uniform inside air temperature profiles. Energy Conversion and Management / Sangho Choi, Moncef Krarti. – September 1996. – Volume 37, Issue 9. – Pages 1435-1444.

5. Продление срока службы коксовых батарей. По материалам IV Европейского конгресса по коксохимическому и доменному производствам [Текст] // Кокс и химия. – 2001. – № 4. – С. 21-25.

6. Гитман, Г. Ф. Прочность жаростойкого бетона на сжатие при нагреве [Текст] / Г.Ф. Гитман, Т.Н. Малкина, А.Ф. Милованов // Жаростойкий бетон и железобетон и области их эффективного применения в строительстве / НИИ бетона и железобетона (НИИЖБ) Госстроя СССР, Волгоградский институт инженеров городского хозяйства. – Волгоград: ВИИГХ, 1969. – 242 с.

7. Десов, А.Е. Кубиковая и призмная прочность бетона при повышенных температурах. Бетоны для атомных реакторов. Т. II. Американский институт бетона. Специальная публикация SP-34 [Текст] / А.Е. Десов, К.Д. Некрасов, А.Ф. Милованов. – Детройт–Мичиган, 1972. – С.423-434.

8. Милованов, А. Ф. Жаростойкий железобетон. [Текст] / А.Ф. Милованов. – М.: Госстройиздат, 1963. – 235 с.

9. Фомин, С.Л. Модернизированная рамная модель расчета коксовых батарей с боковым подводом отопительного газа [Текст]: тези за матеріалами VII Міжнародної наукової конференції «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд» / С.Л. Фомин, А.М. Кравченко. – Харків: ХНУБА, 2015. – С. 149-151.

10. Кравченко, А. М. Экспериментальная модель фрагмента коксовых батарей [Текст] / А.М. Кравченко // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2016. – Вип. 1(83). – С. 134-138.

11. Фомин, С. Л. Температурные поля в конструкциях фундаментов коксовых батарей [Текст] / С.Л. Фомин, А.М. Кравченко // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2013. – Вип. 73. – С. 436-444.

---

Фомин Станіслав Леонідович, д-р техн. наук, професор кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел.: (057) 700-01-63. E-mail: Sfomin@ukr.net.

Кравченко Олександр Михайлович, здобувач наукового ступеню кандидата технічних наук кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій Харківського національного університету будівництва та архітектури. Заступник директора ДП «ГИПРОКОКС». Тел.: (057) 719-22-96. E-mail: kravchenko@giprokoks.com.

Fomin Stanislav Leonidovich. Dr. Sc., professor of chair of concrete and masonry structures at Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: (057) 700-01-63. E-mail: Sfomin@ukr.net.

Kravchenko Alexander Michailovich applicant for scientific degree of candidate of technical sciences at chair of concrete and masonry structures in Kharkiv National University of Construction and Architecture. Deputy Director of SE "GIPROKOKS" Tel.: (057) 719-22-96. E-mail: kravchenko@giprokoks.com.

Стаття прийнята 08.06.2016 р.