Construction of Unique Buildings and Structures
journal homepage: www.unistroy.spbstu.ru`

doi: 10.18720/CUBS.71.5

Трещиностойкость железобетонной стенки в условиях стесненной основанием температурной деформации

Crack-resistance of the reinforced concrete wall under conditions of temperature deformation constrained by the foundation

Ю.Г. Барабанщиков [1], К.В. Семенов [2], С.С. Зимин [3], Н.И. Ватин [4], К.Д. Борщева [5*], Т.В. Белкина [6]

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

Yu.G. Barabanshchikov [1], K.V. Semenov [2], S.S. Zimin [3], N.I. Vatin [4], K.D. Borshcheva [5*], T.V. Belkina [6]

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

железобетон;
трещиностойкость;
термонапряженное состояние;
ANSYS;
температурные воздействия;
прочность;
деформации;
усадка;

KEYWORDS

reinforced concrete;
crack resistance;
thermal stress-strain state;
ANSYS;
thermal forces;
strength;
deformations;
shrinkage;

ИСТОРИЯ

Подана в редакцию: 26.09.2018
Принята: 03.12.2018

ARTICLE HISTORY

Submitted: 26.09.2018
Accepted: 03.12.2018

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается проблема образования температурно-усадочных трещин в тонких (толщиной 200-300 мм) и протяженных железобетонных стенах, возводимых на затвердевшем бетонном основании. При твердении свежеуложенного бетона таких конструкций зачастую наблюдается образование сквозных вертикальных трещин, начинающихся в зоне контакта с основанием и распространяющихся вверх, нередко на всю высоту стены. Растрескивание в этом случае происходит из-за стеснения температурной деформации стены основанием. Опасность представляет, главным образом, процесс остывания стены, когда температурная деформация и усадка действуют в одном направлении и вызывают растягивающие напряжения. Ранее были выдвинуты гипотезы, что можно избежать образования трещин, либо предварительным разогревом бетонного основания, чтобы деформация при остывании была совместной, либо созданием в нижней части стены сквозных поперечных прорезей, которые локализуют деформацию стены в отдельных блоках. В данной работе расчетным путем проверена достоверность указанных гипотез и показана их несостоятельность. Даны рекомендации по уходу за бетоном тонкостенных конструкций, которые в отличие от рекомендаций для массивного бетона имеют свои особенности.

ABSTRACT

The article considers the problems of temperature and contractible cracks formation in thin (200-300 mm) and extensional reinforced concrete walls constructed on hardened concrete foundation. The temperature gradients in walls of small thickness are insignificant and do not cause dangerous tensile stresses, however, the hardening of fresh concrete is often accompanied by the formation of vertical cracks starting at the area of contact with the base and extending upward, sometimes to the full height of the wall. Cracking in such cases occurs due to the thermal deformation constraint by the wall base. Generally, the process of walls cooling after maximum self-heating represents the main danger, when the thermal deformation acts in the same direction with shrinking, that causes the tensile stresses. The aim of the research is to verify the efficiency of the proposed methods of thermal cracking resistance by the results of thermal stress strain state calculation of the reinforced concrete wall rigidly connected to the foundation. The hypotheses, heating the surface of the base before concreting the wall and creating transverse slots formed by the laying of steel plates in the lower zone of the wall, have not proven their effectiveness. The article recommends taking measures to reduce the temperature peak during the first days after concrete has been laid (concreting takes place during the cold time of the day; prevent sunlight from acting on concrete and not using heat insulating shelters or heating). After passing through the temperature peak, it is

necessary to slow down the cooling by applying thermal insulation or heating. Control of shrinkage should be carried out at all stages of concrete production, starting with the selection of its composition.

Содержание

1. Введение 52
2. Методы 53
3. Результаты и обсуждение 54
4. Заключение 60

1. Введение

В статье рассматривается проблема образования температурно-усадочных трещин в тонких (толщиной 200-300 мм) и протяженных железобетонных стенах, возводимых на затвердевшем бетонном основании. Градиенты температуры внутри стен малой толщины незначительны и не вызывают опасных растягивающих напряжений. Несмотря на это, при твердении свежеуложенного бетона нередко наблюдается образование сквозных вертикальных трещин, начинающихся в зоне контакта с основанием и распространяющихся вверх, нередко на всю высоту стены. Растрескивание в этом случае происходит из-за стеснения температурной деформации стены основанием. Опасность представляет, главным образом, процесс остывания стены после разогрева, когда температурная деформация и усадка действуют совместно. При разогреве конструкции усадка частично или полностью компенсирует расширение. Чем выше разогрев стены, тем выше вероятность трещинообразования [1, 2]. Этот процесс наиболее опасен в ранние сроки твердения бетона, когда скорость тепловыделения велика, а прочность бетона незначительна.

В случае массивных бетонных конструкций опасность представляют также внутренние температурные перепады, при которых расширение ядра сдерживается холодным внешним слоем. Последний подвергается растрескиванию, если вынужденные деформации растяжения превышают предельную растяжимость бетона [2-4].

Таким образом, имеют место два механизма образования температурных трещин. Первый связан с разностью температур в разных точках бетонного массива в данный момент времени, второй – с изменением средней температуры блока во времени между моментами достижения максимальной и минимальной температуры бетона при остывании [5-8]. При свободном (не стесненном) расширении-сжатии тела напряжения в нем не возникают [9, 10], и трещин не образуется. В конструкциях же всегда имеются связи, ограничивающие свободу деформаций. Трещины, образующиеся по первому механизму – несквозные, они образуются главным образом в наружном слое бетона и распространяются на глубину действия растягивающих напряжений. Трещины, образующиеся по второму механизму в тонкостенных конструкциях, как правило, сквозные.

Исследования термонапряженного состояния бетона массивных конструкций проводились в достаточно большом объеме [11-13], как в нашей стране, так и за рубежом. Установлено влияние различных факторов на термическую трещиностойкость бетона [14, 15], разработаны соответствующие приемы технологии укладки [16-18] и ухода за бетоном в условиях зимнего [19, 20], весенне-осеннего и летнего бетонирования. Исследована трещиностойкость бетона в зависимости от его состава [21-24], вида и количества добавок [25-27] и пр. В меньшей степени изучен вопрос термического трещинообразования в тонкостенных конструкциях.

Целью работы является проверка эффективности предложенных способов обеспечения трещиностойкости путем определения термонапряженного состояния железобетонной стены, имеющей жесткую связь с бетонным основанием (за счет арматурных выпусков).

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Установить причину образования трещин в тонких железобетонных стенах на одном из стоительных объектов.
2. Произвести расчеты термонапряженного состояния конструкций для условий максимально приближенных к реальным.
3. Проверить две гипотезы решения проблемы трещинообразования в тонкостенных конструкциях (предварительный подогрев основания и установка поперечных разделяющих пластин).
4. Разработать рекомендации по уходу за бетоном.

2. Методы

В качестве экспериментальной конструкции была возведена стена с параметрами, указанными на конструктивной схеме (рис.1.) из бетона класса В45, на цементе ЦЕМ I 42.5 Н с расходом 470 кг/м^3.

Тепловыделение бетона и другие показатели, необходимые для расчетов были определены экспериментально в лаборатории «Политех-СКиМ-Тест». Параметры тепловыделения по уравнению И.Д. Запорожца составляли: q_{max}=340 кДж/кг; A_{20}=0,35 сут-1; m=1,5.

На девятый день твердения бетона при средней температуре наружного воздуха за этот период около 20 °С в нижней части стены были обнаружены сквозные вертикальные трещины. Возможными причинами их образования являются температурные деформации и усадка бетона.

Для проверки влияния температурных деформаций на трещинообразование были проведены расчеты термонапряженного состояния бетона с использованием фактических исходных данных. Рассматривались указанные выше два вида температурных воздействий, вызванных тепловыделением бетона и саморазогревом конструкции.

В первом случае с помощью программы TERM решалась задача распределения температуры по толщине стены и действия термических напряжений в зависимости от времени твердения в линейной и двумерной постановке. Мероприятий по снижению температурных перепадов (теплоизоляция, охлаждение), как и в реальности, не предусматривалось. Предполагалось только наличие полиэтиленовой пленки для защиты от высыхания. Начальная температура бетонной смеси и температура наружного воздуха принималась одинаковой и равной 20 °С. Значения температуры в центре и на боковой поверхности стены в зависимости от времени твердения показаны на рис. 3, а соответствующие значения термических напряжений на рис. 4. Рисунок 5 отображает решение двумерной задачи, характеризующее состояние зоны примыкания стены к основанию.

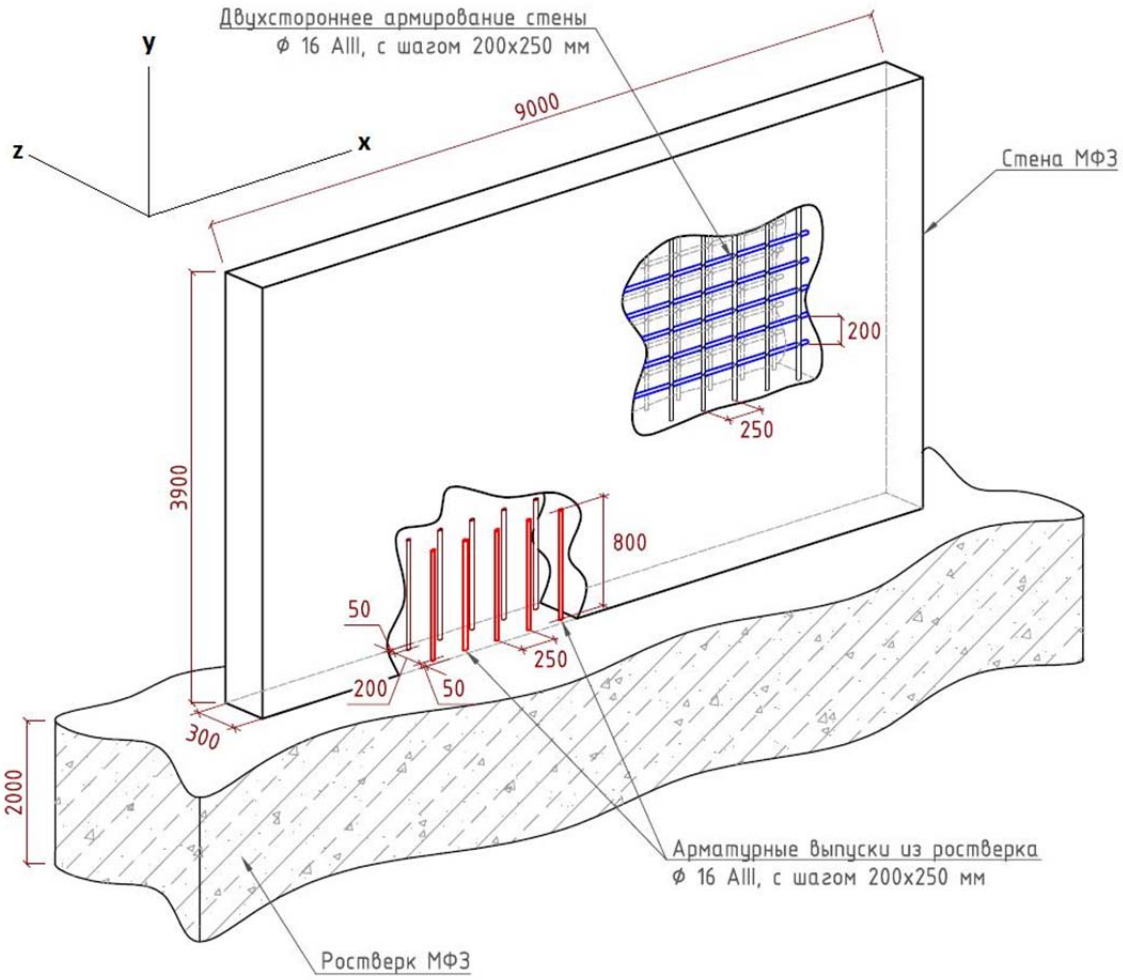

Рисунок 1. Конструктивная схема стены жестко закрепленной на фундаментной плите

Barabanshchikov, Yu.G., Semenov, K.V., Zimin, S.S., Vatin, N.I., Borshcheva, K.D., Belkina, T.V.. Crack-resistance of the reinforced concrete wall under conditions of temperature deformation constrained by the foundation. Construction of Unique Buildings and Structures. 2018. 71(8). Pp. 51-62. DOI: 10.18720/CUBS.71.5

Для анализа второго вида температурных воздействий и механизма развития трещин выполнялись расчеты в комплексе конечно-элементного моделирования ANSYS в пространственной постановке. Моделированию подлежал процесс охлаждения стенки, жестко защемленной на фундаментной плите. Бетон фундаментной плиты предполагался «мертвым», но деформируемым и разогреваемым теплом стенки.

Температурное воздействие задавалось в соответствии с распределением температурных полей, полученных в программе TERM в зависимости от времени. В расчетной модели принята разность между средними по объему значениями температуры на первые и третьи сутки твердения в 10 °С (температура снизилась с 32 до 22 С).

В качестве критериев трещинообразования в соответствии с СП 63.13330.2012 приняты:

1. достижение главными растягивающими напряжениями предельного значения $R_{bt,ser}$=2,25 МПа (по II группе предельных состояний для класса бетона В45);
2. достижение главными относительными линейными деформациями своего предельного значения, ε_{bt0}=0,0001. Через трое суток после начала набора прочности ε_{bt0} =0,00005 (СП 41.13330.2012).

Конструктивная схема моделируемой стенки и фундаментной плиты приведена выше на рис.1; расчетная модель приведена на рис. 2.

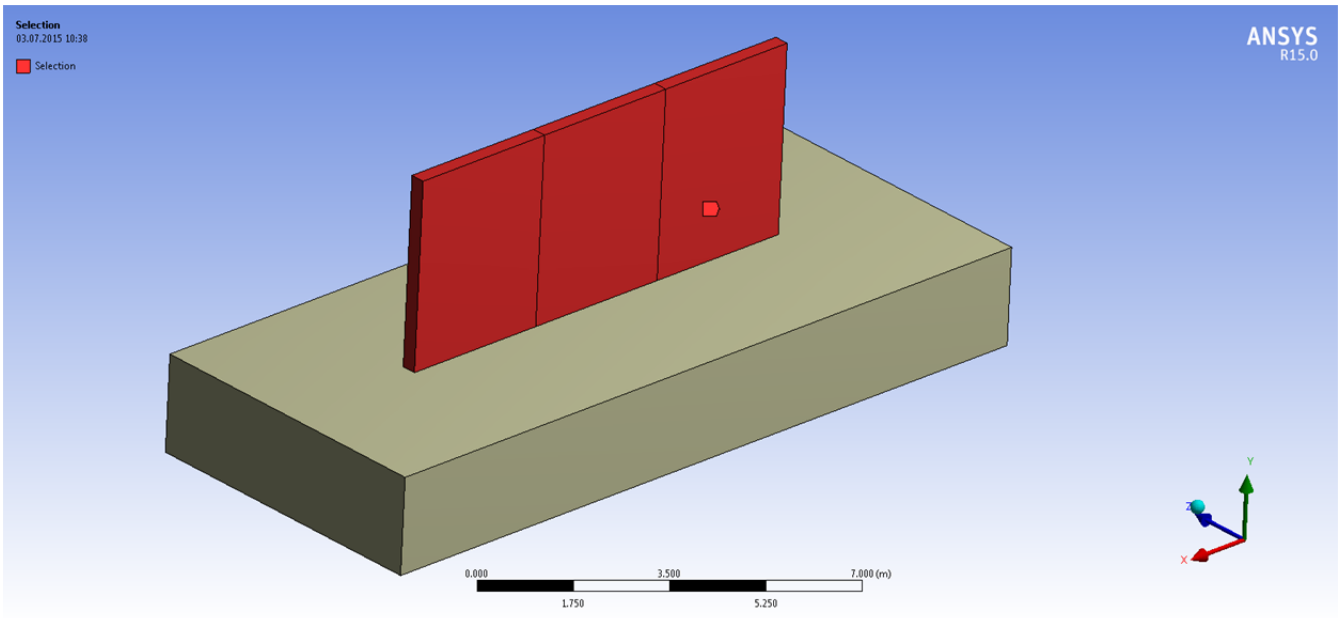

Рисунок 2. Расчетная схема (модель) стены.

Для расчета совместного действия температурных и усадочных деформаций использованы характеристики бетона в возрасте 7 суток**.** Значение усадки бетона составляет в этом возрасте 0,15 мм/м. Предельная растяжимость бетона с учетом деформации ползучести бетона определяется по формуле:

$$\varepsilon_{lim}=R_{bt}/E_{bt}+\varepsilon_{п} \quad (1)$$

где R_{bt} – предел прочности при растяжении;
E_{bt} – модуль упругости при растяжении;
$\varepsilon_{п}$ – деформация ползучести.

3. Результаты и обсуждение

Расчеты, выполненные при варьировании температуры внешней среды и значений конвективной теплоотдачи, показали, что трещиностойкость бетона при вынужденных деформациях растяжения, вызванных перепадами температур, как по толщине стены, так и в зоне примыкания к основанию полностью обеспечивается.

Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Зимин С.С., Ватин Н.И., Борщева К.Д., Белкина Т.В.. Трещиностойкость железобетонной стенки в условиях стесненной основанием температурной деформации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 8(71). С. 51-62. DOI: 10.18720/CUBS.71.5

Рисунок 3. Значения температуры в центре и на боковой поверхности стены в зависимости от времени твердения

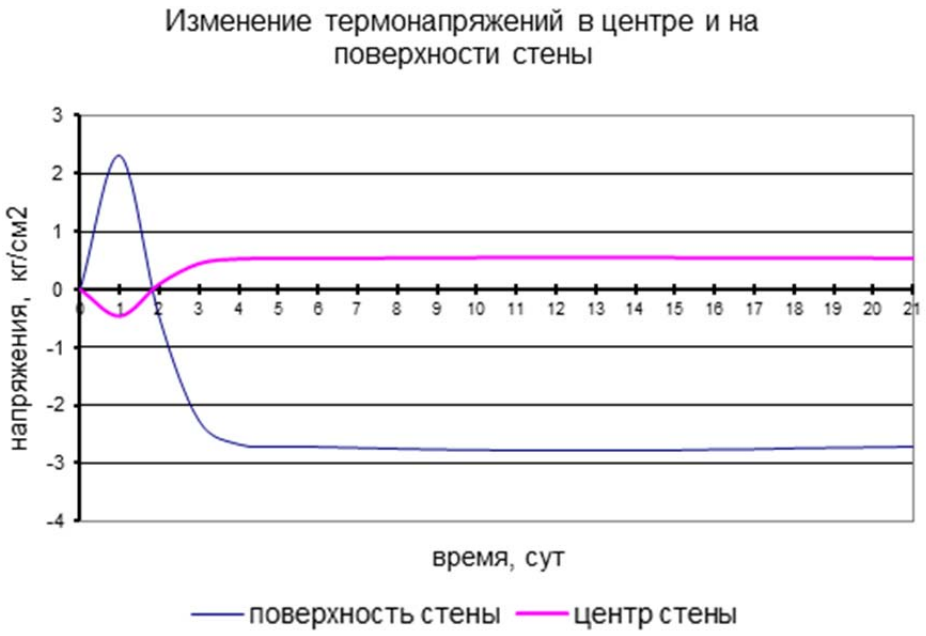

Рисунок 4. Значения термических напряжений в центре и на поверхности стены в зависимости от времени твердения

Деформация ползучести при температуре 20 °С равна $\varepsilon_п$ = 0,1 мм/м, тогда по формуле (1):

$$\varepsilon_{lim}= 0,117+0,1=0,217 \text{ мм/м}.$$

Согласно рис. 3 максимальная температура в центральной части стены достигается на 1 сутки и составляет 32 °С, через 6 суток бетон остывает до температуры 21 °С, т.е. на 11 °С.

При остывании бетона на 11 °С свободная температурная деформация сжатия вдоль оси X стеснена жесткой заделкой в основании (арматурные выпуски установлены с шагом 200x250 мм). При ограниченной жесткими связями деформации температурного сжатия в нижней части стены возникают растягивающие напряжения. Сдержанная деформация составляет:

$$\varepsilon=КЛТР\cdot\Delta t=0,0103\cdot 11=0,113 \text{ мм/м}.$$

Из полученных значений видно, что как деформация усадки (0,15 мм/м), так и температурная деформация (0,113 мм/м), по отдельности не превышают предельной растяжимости бетона, равной

Barabanshchikov, Yu.G., Semenov, K.V., Zimin, S.S., Vatin, N.I., Borshcheva, K.D., Belkina, T.V.. Crack-resistance of the reinforced concrete wall under conditions of temperature deformation constrained by the foundation. Construction of Unique Buildings and Structures. 2018. 71(8). Pp. 51-62. DOI: 10.18720/CUBS.71.5

ε_{lim}=0,217 мм/м. Однако их сумма, составляющая 0,15+0,113=0,263 мм/м больше ε_{lim}, и, следовательно, трещинообразование вызвано совместным воздействием двух процессов, сдерживаемых жесткими связями: температурным расширением-сжатием и усадочными явлениями.

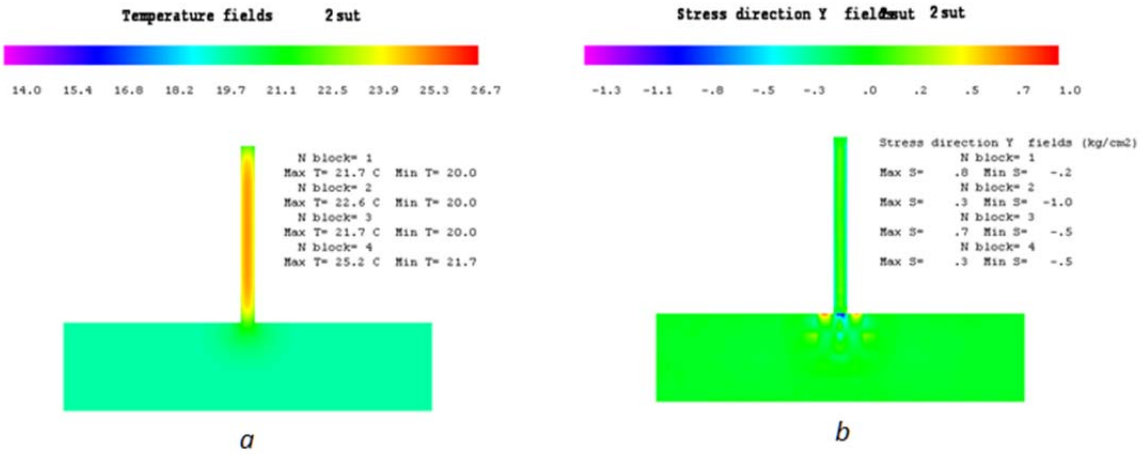

Рисунок 5. Распределение температуры (*a*) и термонапряжений (*b*) по сечению стены на вторые сутки твердения бетона

3.1. Анализ напряженно-деформируемого состояния стенки

Модель в деформированном состоянии представлена на рисунке 6.

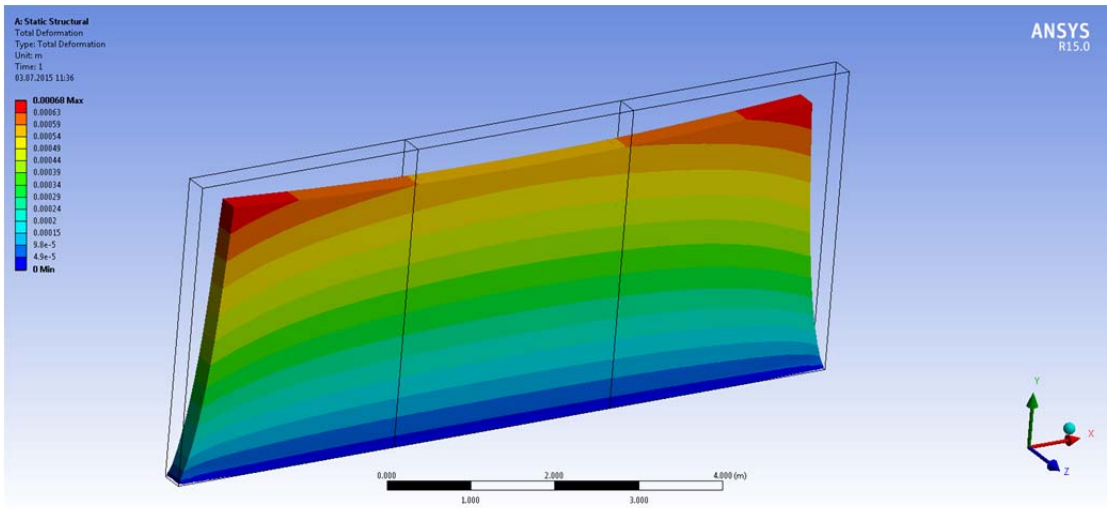

Рисунок 6. Деформация стены на 3 сутки после остывания

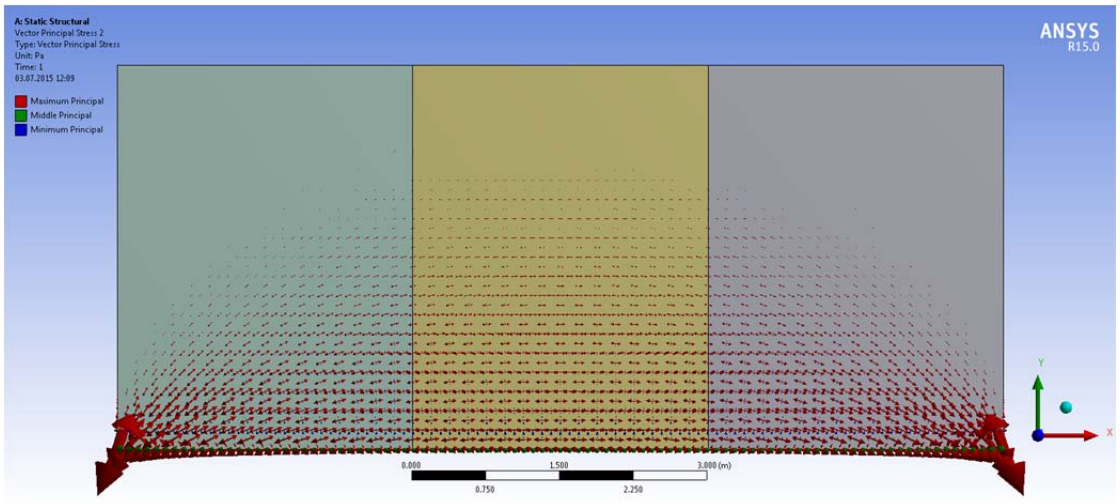

Рисунок 7. Траектория главных растягивающих напряжений

Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Зимин С.С., Ватин Н.И., Борщева К.Д., Белкина Т.В.. Трещиностойкость железобетонной стенки в условиях стесненной основанием температурной деформации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 8(71). С. 51-62. DOI: 10.18720/CUBS.71.5

Анализ траектории главных растягивающих напряжений (рис. 7) позволяет отметить следующее.

– главные растягивающие напряжения достигают наибольшего значения в зоне сопряжения стенки с фундаментной плитой. Данное обстоятельство объясняет рост трещин снизу вверх, а также повышенное число и большую ширину раскрытия трещин в нижней области стены [15, 16].

– траектория главных растягивающих напряжений в средней по длине трети стены расположена горизонтально, в крайних третях имеет наклон, который увеличивается к торцам стенки. Данное обстоятельство соотносится с картиной трещинообразования в стенке: трещины располагаются нормально к траектории растягивающих напряжений, поэтому в середине они вертикальны, а по краям наклонены в сторону торцов стенки.

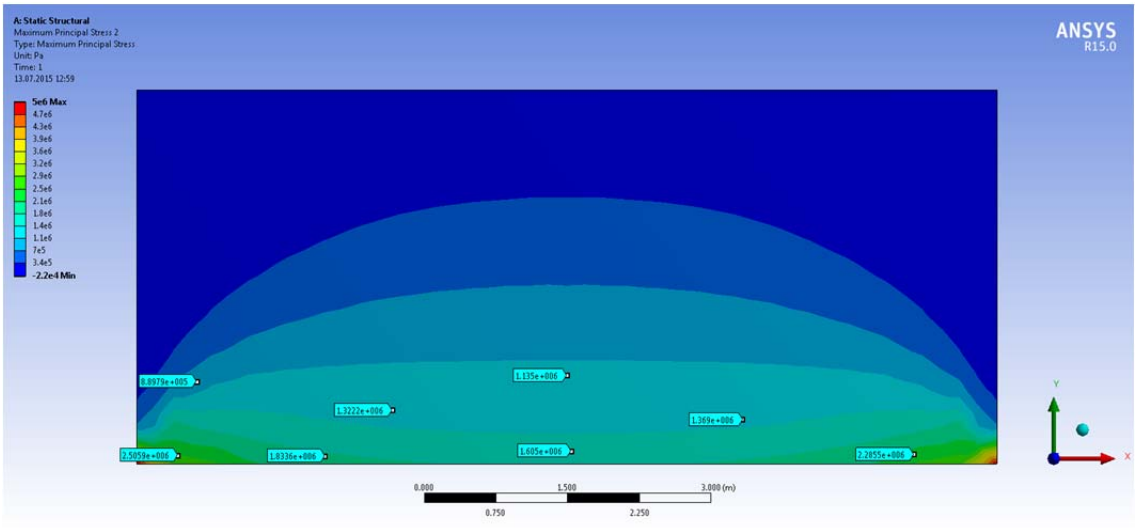

Рисунок 8. Изополя главных растягивающих напряжений

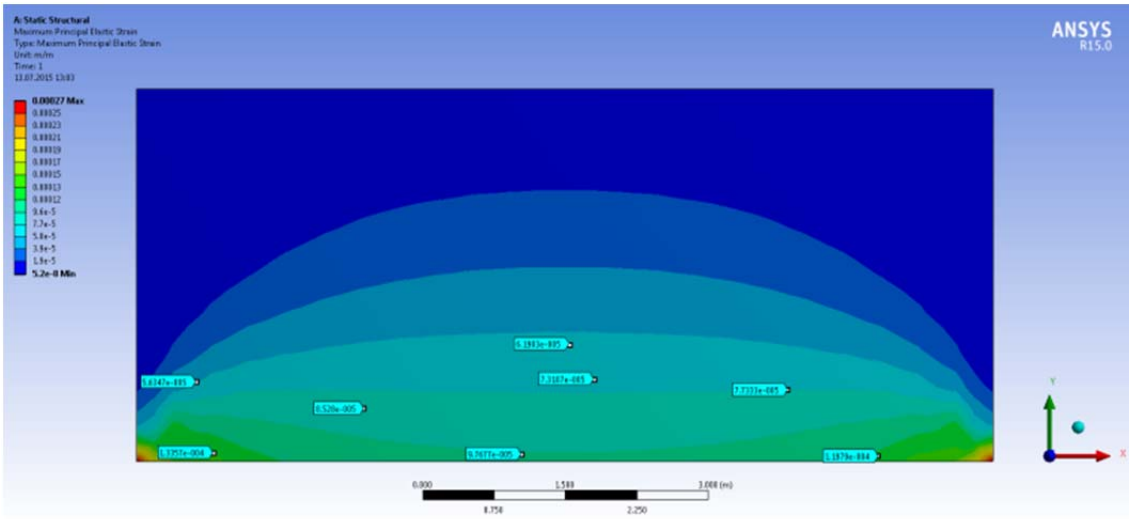

Рисунок 9. Изополя главных относительных линейных деформаций

Анализ числовых значений изополей главных растягивающих напряжений и главных относительных линейных деформаций (рис. 8 и 9) позволяет констатировать:

– в угловых зонах стенки при сопряжении с фундаментной плитой главные напряжения и деформации растяжения достигают своих наибольших значений. Данные зоны являются концентраторами напряжений и в рамках данной задачи не анализируются;

– наибольшие значения главных растягивающих напряжений в пределах нижней четверти стенки (вне зоны концентрации напряжений) колеблются в пределах [1,0 ÷ 2,0] МПа (см. рис. 8) при принятом предельном значении $R_{bt,ser}$=2,25 МПа;

– наибольшие значения главных относительных линейных деформаций в пределах нижней четверти стенки (вне зоны концентрации напряжений) колеблются в пределах [0,00007÷0,0001] (см. рис. 9) при принятых предельных значениях ε_{bt0}=0,0001 и ε_{bt0} (3 сут)=0,00005.

Barabanshchikov, Yu.G., Semenov, K.V., Zimin, S.S., Vatin, N.I., Borshcheva, K.D., Belkina, T.V.. Crack-resistance of the reinforced concrete wall under conditions of temperature deformation constrained by the foundation. Construction of Unique Buildings and Structures. 2018. 71(8). Pp. 51-62. DOI: 10.18720/CUBS.71.5

Данные обстоятельства свидетельствуют о возможности образования и развития трещин в нижней области стенки от принятого в расчетах температурного воздействия; ширина раскрытия данных трещин носит затухающий характер по высоте стенки. Похожие результаты мы можем найти в статьях [17, 18], исследующих причины образования трещин в многослойных стенах и массивных конструкциях.

3.2. Анализ возможных вариантов предотвращения появления и развития трещин

Рассматривалось две рабочие гипотезы решения проблемы.

Гипотеза 1. Подогрев поверхности основания перед началом бетонирования стенки вызовет одновременное остывание и стенки и фундаментной плиты, что выровняет их деформации и, соответственно, уменьшит интенсивность напряжений.

Подогрев бетона плиты с последующим остыванием в расчетной модели задавалось как единственное воздействие.

Расчеты деформированного состояния системы стенка-фундаментная плита (рис. 10, 11) позволяют отметить, что при разогреве ограниченного участка фундаментной плиты под основанием стенки периферийная часть плиты остается холодной и сдерживает деформации разогретого участка, для которого имеется только одна возможность расширения вверх. Аналогично, при остывании участок под стенкой будет перемещаться вниз, а не укорачиваться вместе со стенкой в горизонтальном направлении из-за жесткого защемления внутри массивной фундаментной плиты.

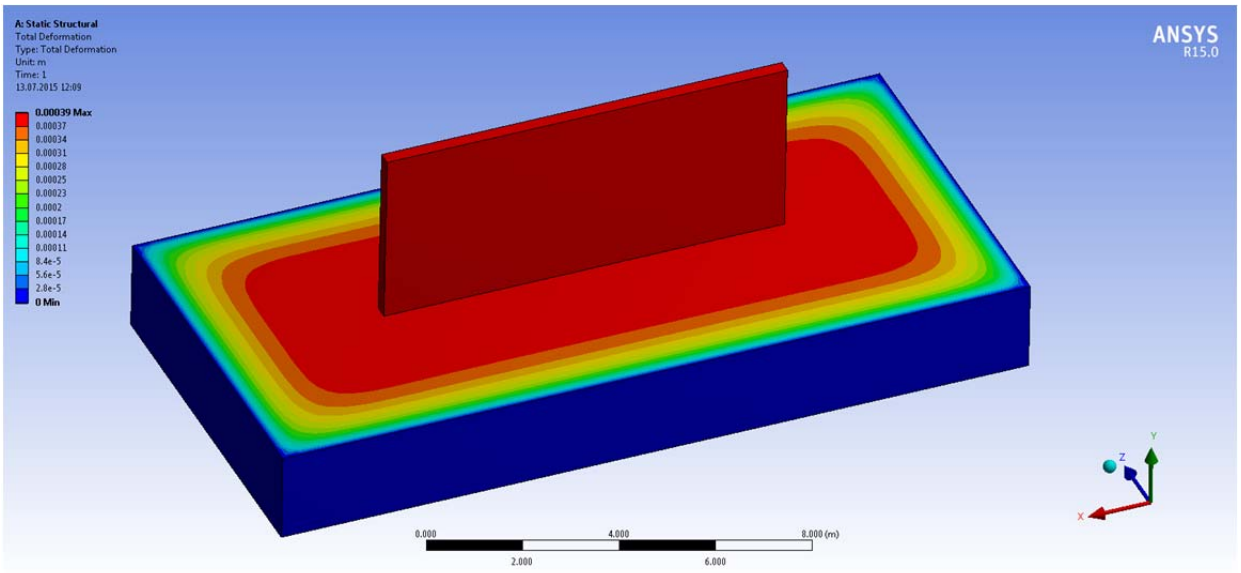

Рисунок 10. Изополя перемещений. Недеформированное состояние

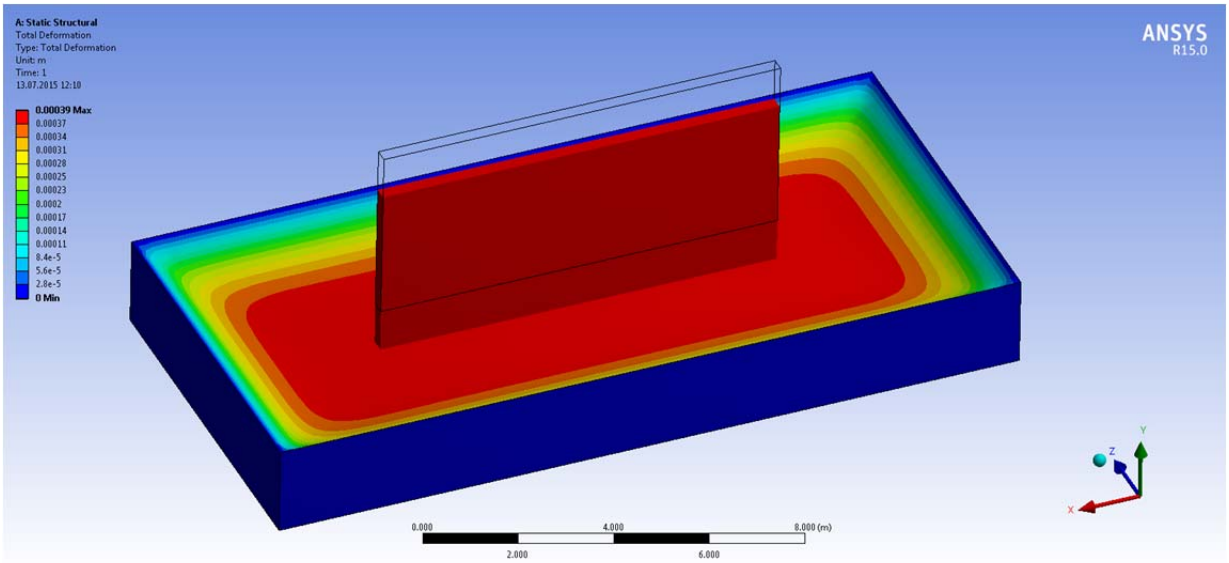

Рисунок 11. Изополя перемещений. Деформированное состояние фундаментной плиты после остывания (поверхность плиты вместе со стенкой переместилась вниз)

Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Зимин С.С., Ватин Н.И., Борщева К.Д., Белкина Т.В.. Трещиностойкость железобетонной стенки в условиях стесненной основанием температурной деформации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 8(71). С. 51-62. DOI: 10.18720/CUBS.71.5

Таким образом, деформации укорочения стенки, происходящие в горизонтальном направлении, остаются стесненными, и не реализуются частичным нагревом основания.

Гипотеза 2. Создание в нижней зоне стенки сквозных поперечных прорезей, образованных закладкой стальных пластин.

Шаг пластин в расчетной модели принят 1,5 м, высота – 0,25 м.

Изополя главных растягивающих напряжений и главных относительных линейных деформаций (см. рис. 12, 13) показывают, что наибольшие значения главных растягивающих напряжений и деформаций в пределах нижней четверти высоты стенки (вне зоны концентрации напряжений) находятся в том же диапазоне, что напряжения и деформации, установившиеся в бетоне в расчетной модели без пластин. Следовательно, данное мероприятие неэффективно.

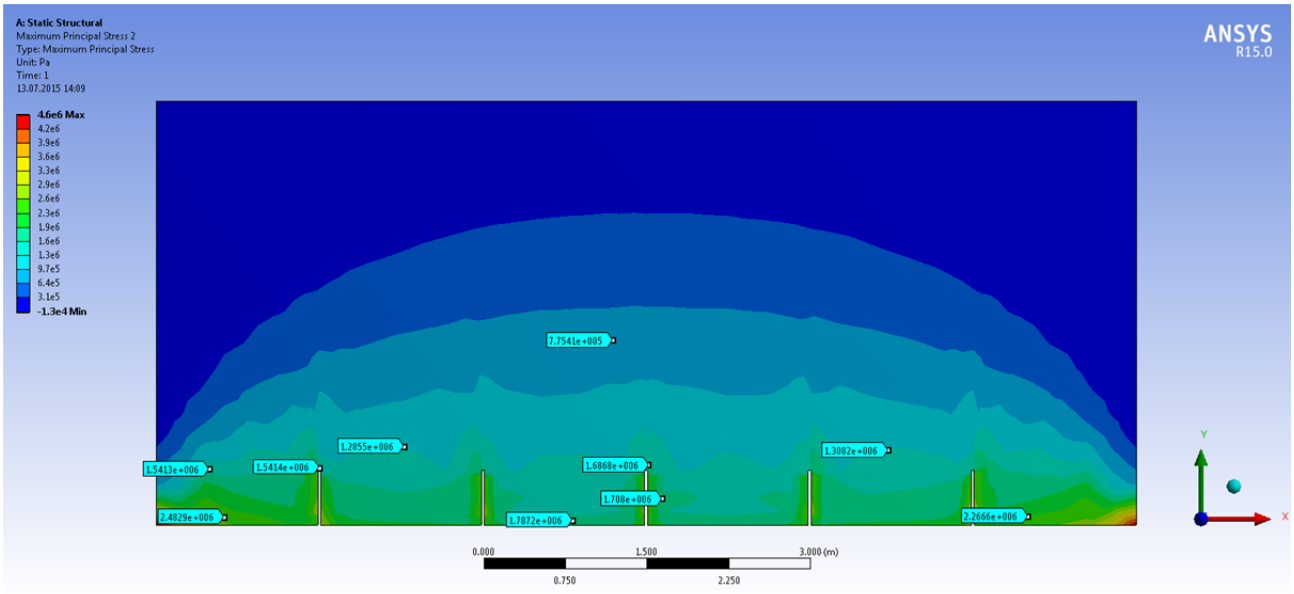

Рисунок 12. Изополя главных растягивающих напряжений (расчетная модель с применением закладных пластин)

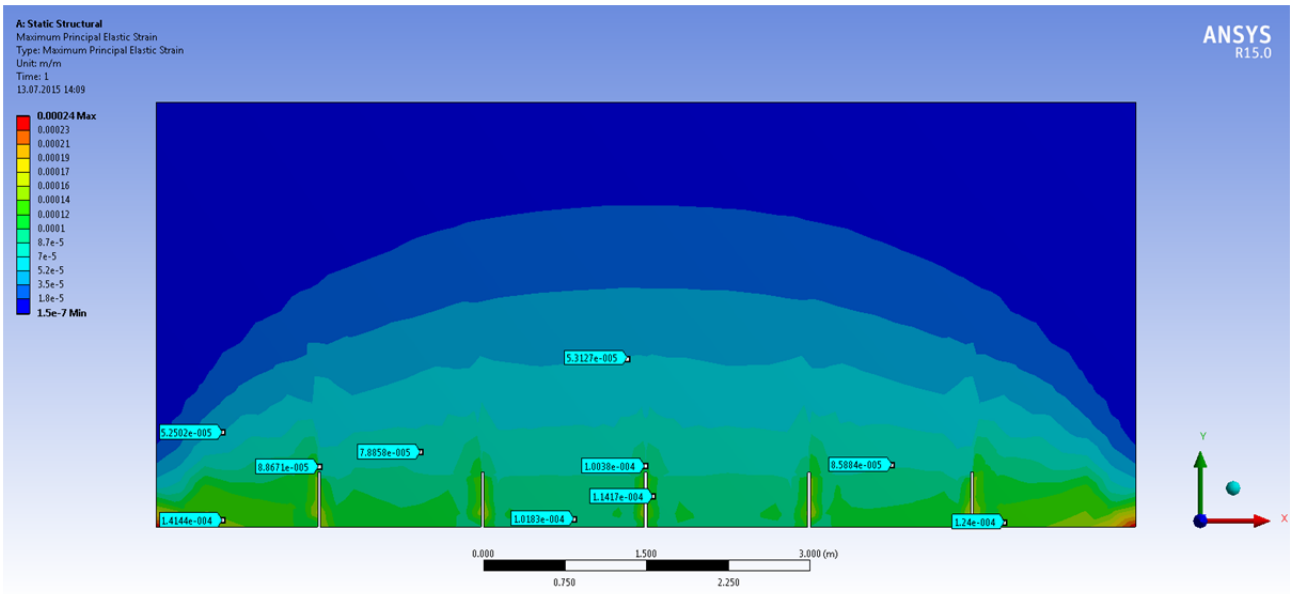

Рисунок 13. Изополе главных относительных линейных деформаций (расчетная модель с применением закладных пластин)

По результатам расчетов мы наблюдаем, что главные растягивающие напряжения достигают наибольшего значения в зоне сопряжения стенки с фундаментной плитой. Данное обстоятельство объясняет рост трещин снизу вверх, а также повышенное число и большую ширину раскрытия трещин в нижней области стены. В статье [16] рассматривается определение кривых устойчивости остаточных

Barabanshchikov, Yu.G., Semenov, K.V., Zimin, S.S., Vatin, N.I., Borshcheva, K.D., Belkina, T.V.. Crack-resistance of the reinforced concrete wall under conditions of temperature deformation constrained by the foundation. Construction of Unique Buildings and Structures. 2018. 71(8). Pp. 51-62. DOI: 10.18720/CUBS.71.5

трещин (K R-кривых), связанных с распределением когезионной силы на фиктивной зоне трещины полного процесса разрушения. Когезионная сила распределяется по закону билинейного размягчения тягового разделения, предложенному Петерсоном. Рассмотрены всего десять температур от 20 до 600 ° C и размер образца 230 × 200 × 200 мм с начальными значениями глубины 0,4. Кривые смещения отверстий в трещине нагрузки (P-CMOD) образцов после обжига получают методом клинового расщепления, из которого рассчитываются кривые коэффициента интенсивности напряжений (K-кривые). При каждой температуре с распределением когезионной силы вдоль зоны процесса разрушения вязкость остаточного разрушения K R (Δa) увеличивается с увеличением длины трещины Δ a, тогда как K R-кривые уменьшаются с ростом температуры T m для вызванного теплового повреждения. Анализ устойчивости при распространении трещины показывает, что, когда остаточная K-кривая выше, чем K-кривая, трещина распространяется устойчиво; в противном случае трещина распространяется неустойчиво.

Возможность образования и развития трещин в нижней области стенки от принятого в расчетах температурного воздействия, ширина раскрытия данных трещин носит затухающий характер по высоте стенки. Похожие результаты мы можем найти в статьях [17,18] в которых исследуются причины образования трещин в многослойных стенах и массивных конструкциях.

4. Заключение

1. Расчеты подтвердили, что опасность образования трещин в тонкой и протяженной железобетонной стене представляет стесненная основанием температурно-усадочная деформация стены. В течение первых суток за счет тепловыделения (а зимой и обогрева) температура бетона растет, вызывая стремление его к расширению, которое, однако, частично или полностью компенсируется усадкой. В то же время тепловое расширение арматурного каркаса вызывает растяжение бетона и может привести к растрескиванию уже на стадии разогрева. Если бетонная смесь укладывается на сухое основание, то последнее, отсасывая воду и обезвоживая бетон, увеличивает усадку. Далее следует период остывания стены, в котором она стремится к сокращению длины, чему препятствует основание. В этот период температурное сжатие и усадка действуют совместно, увеличивая растягивающие напряжения в зоне контакта стены с основанием, в результате чего возникают трещины. Если остывание происходит относительно быстро, то бетон не успевает набрать достаточную прочность, следовательно, остывание бетона нужно сделать медленным.
2. Рассмотренный в работе процесс образования трещин в тонкостенных конструкциях особенно опасен в зимних условиях бетонирования, когда применяется утепление или электрообогрев бетона.
3. В работе проверены две рабочие гипотезы решения проблемы трещинообразования в тонкостенных конструкциях (предварительный подогрев основания и установка поперечных разделяющих пластин). Указанные методы, однако, не дали положительных результатов.
4. Таким образом, уход за бетоном тонкостенных конструкций разделяется на 2 периода. В первом периоде до максимального подъема температуры, т.е. в течение первых суток после укладки следует принимать традиционные меры по снижению температурного пика, например, производить бетонирование в холодное время суток; не допускать действия на бетон солнечного света и не применять утепляющих укрытий или подогрева, если нет опасности замораживания бетона. Во втором периоде после прохождения температурного пика спустя определенное время (чтобы не было дополнительного подъема температуры) необходимо замедлить остывание, применяя теплоизоляцию для увеличения периода набора прочности до полного остывания.

Литература

[1]. Zhou, Y., Meng, D., Wang, Y. Finite-Element Simulation of Hydration and Creep of Early-Age Concrete Materials // Journal of Materials in Civil Engineering. 2014, Vol. 26, No. 11. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943 5533.0001105

[2]. Дудин М.О., Ватин Н.И., Барабанщиков Ю.Г. Моделирование набора прочности бетона в программе ELCUT при прогреве монолитных конструкций проводом // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2 (54). С. 33-45. doi: 10.5862/MCE.54.4

[3]. Shi, N., Ouyang, J. , Zhang, R. ,Huang, D., Experimental study on early-age crack of mass concrete under the controlled temperature history // Advances in Materials Science and Engineering. Volume 2014, 2014, Article number 671795.

References

[1]. Zhou, Y., Meng, D., Wang, Y. Finite-Element Simulation of Hydration and Creep of Early-Age Concrete Materials. Journal of Materials in Civil Engineering. 2014, Vol. 26, No. 11. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001105

[2]. Dudin M.O., Vatin N.I., Barabanshchikov Yu.G. Modelirovaniye nabora prochnosti betona v programme ELCUT pri progreve monolitnykh konstruktsiy provodom [Modeling a set of concrete strength in the program ELCUT at warming of monolithic structures by wire]. Magazine of Civil Engineering. 2015. No. 2(54). Pp. 33-45. (rus). doi: 10.5862/MCE.54.4

[3]. Shi, N., Ouyang, J., Zhang, R., Huang, D., Experimental study on early-age crack of mass concrete under the controlled temperature history. Advances in Materials Science and Engineering. Volume 2014, 2014, Article number 671795

Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Зимин С.С., Ватин Н.И., Борщева К.Д., Белкина Т.В.. Трещиностойкость железобетонной стенки в условиях стесненной основанием температурной деформации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 8(71). С. 51-62. DOI: 10.18720/CUBS.71.5

[4]. Schackow, A., Effting, C., Gomes, I.R., Vicenzi, F., Kramel, C. Temperature variation in concrete samples due to cement hydration // Applied Thermal Engineering.

[5]. Embaby, R., Embaby, A., Malek, C. Early age cracks of concrete casted in different stages. ABSE Conference, Geneva 2015 // Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges.

[6]. Semenov K.V., Barabanshchikov Yu.G., Maintenance of thermal cracking resistance in massive concrete base slabs during winter concreting // Construction of Unique Buildings and Structures. 2014. No. 2 (17). Pp. 125-135.

[7]. Korotchenko, I., Ivanov, E., Semenov, K., Barabanshchikov, Y. Thermal Stressed State in Massive Concrete Structures in the Winter Building Period (2016) // MATEC Web of Conferences, 53, Art. No. 01001

[8]. Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Шевелев М.В. Термонапряженное состояние купола защитной оболочки лаэс-2 и обеспечение термической трещиностойкости бетона // В сборнике: Бетон и железобетон - взгляд в будущее. научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: В семи томах. 2014. С. 214-224.

[9]. Peresipkin E.N., Pochinok V.P., Shevtsov V.S., Shevtsov S.V. Impact of Concrete Type on Crack Resistance of Reinforced Concrete Constructions // European researcher, 2012, Vol.(21), No 5-2, pp. 622-625

[10]. Dahmani L., Hammar R., Mechiche M.O. Cracking response of a concrete wall to cryogenic temperature // Defect and Diffusion Forum.

[11]. Honorio, T., Bary, B.,Benboudjema, F. Factors affecting the thermo-chemo-mechanical behaviour of massive concrete structures at early-age // Materials and Structures

[12]. Дудин М.О., Барабанщиков Ю.Г. Специфика монтажа электрического провода в технологии прогрева бетона // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 6. С. 47-61.

[13]. Xu, S., Shen, L., Wang, J. The high-temperature resistance performance of TRC thin-plates with different cementitious materials: Experimental study.

[14]. Potapov Y., Polikutin A., Panfilov D., Okunev M., Comparative analysis of strength and crack resistance of normal sections of bent elements of T-sections, made of rubber concrete, kauton reinforcement and concrete // XV International Conference “Topical Problems of Architecture, Civil Engineering, Energy Efficiency and Ecology – 2016” MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 73. Art.No. 04018.

[15]. Xi Wu, Zhi-Min Wu, Wei Dong, Yu-Fei Wu, An analytical method for determining the crack extension resistance curve of concrete // Magazine of Concrete Research. No. 66(14). Pp. 719-728.

[16]. Chen J., Lu Z. Crack Extension Resistance of Normal-Strength Concrete Subjected to Elevated Temperatures // Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2014, Article ID 683756, doi:10.1155/2014/683756

[17]. Zimin S., Alzhanova R., Litovchenko V. Causes of formation of cracks in the outer masonry of multilayer walls in the zone interwindow belts and partition // MATEC Web of Conferences. Volume 53, 2016

[18]. Liu, G., Hu, Y., Li, Q., Zuo, Z. XFEM for thermal crack of massive concrete // Mathematical Problems in Engineering, 2013, art. no. 343842, DOI: 10.1155/2013/343842.

[19]. Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В. Термонапряженное состояние бетона и обеспечение его термической трещиностойкости // Популярное бетоноведение. 2011. № 1-2. С. 70-73.

[20]. Qiang S., Zheng W., Zhang Y., Liu L. Optimization of concrete temperature control measures based on improved particle

[4]. Schackow, A., Effting, C., Gomes, I.R., Vicenzi, F., Kramel, C. Temperature variation in concrete samples due to cement hydration. Applied Thermal Engineering.

[5]. Embaby, R., Embaby, A., Malek, C. Early age cracks of concrete casted in different stages. ABSE Conference, Geneva 2015: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges.

[6]. Semenov K.V., Barabanshchikov Yu.G., Maintenance of thermal cracking resistance in massive concrete base slabs during winter concreting. Construction of Unique Buildings and Structures. 2014. No. 2 (17). Pp. 125-135.

[7]. Korotchenko, I., Ivanov, E., Semenov, K., Barabanshchikov, Y. Thermal Stressed State in Massive Concrete Structures in the Winter Building Period (2016) MATEC Web of Conferences, 53, Art. No. 01001

[8]. Barabanshchikov Yu.G., Semenov K.V., Shevelev M.V. Termonapryazhennoye sostoyaniye kupola zashchitnoy obolochki laes-2 i obespecheniye termicheskoy treshchinostoykosti betona [Thermal stress state of the Laes-2 containment dome and provision of thermal crack resistance of concrete]. V sbornike: Beton i zhelezobeton - vzglyad v budushcheye. nauchnyye trudy III Vserossiyskoy (II Mezhdunarodnoy) konferentsii po betonu i zhelezobetonu: V semi tomakh. 2014. Pp. 214-224. (rus)

[9]. Peresipkin E.N., Pochinok V.P., Shevtsov V.S., Shevtsov S.V. Impact of Concrete Type on Crack Resistance of Reinforced Concrete Constructions. European researcher, 2012, Vol.(21), No. 5-2, pp. 622-625

[10]. Dahmani L., Hammar R., Mechiche M.O. Cracking response of a concrete wall to cryogenic temperature. Defect and Diffusion Forum.

[11]. Honorio, T., Bary, B.,Benboudjema, F. Factors affecting the thermo-chemo-mechanical behaviour of massive concrete structures at early-age. Materials and Structures

[12]. Dudin M.O., Barabanshchikov Yu.G. Spetsifika montazha elektricheskogo provoda v tekhnologii progreva betona. Stroitelstvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy. 2015. № 6. S. 47-61.

[13]. Xu, S., Shen, L., Wang, J. The high-temperature resistance performance of TRC thin-plates with different cementitious materials: Experimental study

[14]. Potapov Y., Polikutin A., Panfilov D., Okunev M., Comparative analysis of strength and crack resistance of normal sections of bent elements of T-sections, made of rubber concrete, kauton reinforcement and concrete. XV International Conference “Topical Problems of Architecture, Civil Engineering, Energy Efficiency and Ecology – 2016” MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 73. Art.No. 04018.

[15]. Xi Wu, Zhi-Min Wu, Wei Dong, Yu-Fei Wu, An analytical method for determining the crack extension resistance curve of concrete. Magazine of Concrete Research. No. 66(14). Pp. 719-728.

[16]. Chen J., Lu Z. Crack Extension Resistance of Normal-Strength Concrete Subjected to Elevated Temperatures. Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2014, Article ID 683756, doi:10.1155/2014/683756

[17]. Zimin S., Alzhanova R., Litovchenko V. Causes of formation of cracks in the outer masonry of multilayer walls in the zone interwindow belts and partition. Volume 53, 2016. MATEC Web of Conferences

[18]. Liu, G., Hu, Y., Li, Q., Zuo, Z. XFEM for thermal crack of massive concrete. Mathematical Problems in Engineering, 2013, art. no. 343842, DOI: 10.1155/2013/343842.

[19]. Barabanshchikov Yu.G., Semenov K.V. Termonapryazhennoye sostoyaniye betona i obespecheniye yego termicheskoy treshchinostoykosti [Thermal stress state of concrete and ensuring its thermal crack resistance]. Populyarnoye betonovedeniye. 2011. No. 1-2. Pp. 70-73. (rus)

[20]. Qiang S., Zheng W., Zhang Y., Liu L. Optimization of concrete temperature control measures based on improved particle swarm optimization and finite element method. Nongye Gongcheng

Barabanshchikov, Yu.G., Semenov, K.V., Zimin, S.S., Vatin, N.I., Borshcheva, K.D., Belkina, T.V.. Crack-resistance of the reinforced concrete wall under conditions of temperature deformation constrained by the foundation. Construction of Unique Buildings and Structures. 2018. 71(8). Pp. 51-62. DOI: 10.18720/CUBS.71.5

swarm optimization and finite element method. Nongye Gongcheng Xuebao // Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering.

[21]. Sprince A., Pakrastinsh, L., Vatin, N. Crack Formation in Cement-Based Composites // (2016) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 123 (1), art. no. 012050

[22]. Klyuev, S.V., Klyuev, A.V., Khezhev, T.A., Pukharenko, Y. High-strength fine-grained fiber concrete with combined reinforcement by fiber // (2018) Journal of Engineering and Applied Sciences, 13, pp. 6407-6412.

[23]. Klyuyev, S.V., Klyuyev, A.V., Sopin, D.M., Netrebenko, A.V., Kazlitin, S.A. Heavy loaded floors based on fine-grained fiber concrete // Magazine of Civil Engineering. 2013. 38 (3), Pp. 7-14.

[24]. Merkulov, S.I., Lesovik, R.V., Klyuev, S., Kalashnikov, N. Strength and deformability of reinforced concrete structures in service // World Applied Sciences Journal. 2013. 25 (12), Pp. 1747-1750.

[25]. Zibarev, P.V., Zubkova, O.A., Shepelenko, T.S., Nedavnii, O.I. Gas chromatographic control of toxic organic microimpurities in water via the method of concentration on modified porous polymer sorbents // Russian Journal of Nondestructive Testing, 42 (6), pp. 418-423.

[26]. Shepelenko, T.S., Zibarev, P.V. Specific adsorption of styrene-divinylbenzene copolymers modified by radiation-assisted nitration // Zhurnal Fizicheskoj Khimii, 2001. 75 (8), Pp. 1482-1486.

[27]. Shepelenko, T.S., Sarkisov, U.S., Gorlenko, N.P., Tsvetkov, N.A., Zubkova, O.A. Structure-forming processes of cement composites, modified by sucrose additions // Magazine of Civil Engineering. 2016. 66 (6). Pp. 3-11.

Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering.

[21]. Sprince A., Pakrastinsh, L., Vatin, N. Crack Formation in Cement-Based Composites (2016) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 123 (1), art. no. 012050

[22]. Klyuev, S.V., Klyuev, A.V., Khezhev, T.A., Pukharenko, Y. High-strength fine-grained fiber concrete with combined reinforcement by fiber (2018) Journal of Engineering and Applied Sciences, 13, Pp. 6407-6412.

[23]. Klyuyev, S.V., Klyuyev, A.V., Sopin, D.M., Netrebenko, A.V., Kazlitin, S.A. Heavy loaded floors based on fine-grained fiber concrete (2013) Magazine of Civil Engineering, 38 (3), Pp. 7-14.

[24]. Merkulov, S.I., Lesovik, R.V., Klyuev, S., Kalashnikov, N. Strength and deformability of reinforced concrete structures in service (2013) World Applied Sciences Journal, 25 (12), Pp. 1747-1750.

[25]. Zibarev, P.V., Zubkova, O.A., Shepelenko, T.S., Nedavnii, O.I. Gas chromatographic control of toxic organic microimpurities in water via the method of concentration on modified porous polymer sorbents (2006) Russian Journal of Nondestructive Testing, 42 (6), Pp. 418-423.

[26]. Shepelenko, T.S., Zibarev, P.V. Specific adsorption of styrene-divinylbenzene copolymers modified by radiation-assisted nitration (2001) Zhurnal Fizicheskoj Khimii, 75 (8), Pp. 1482-1486.

[27]. Shepelenko, T.S., Sarkisov, U.S., Gorlenko, N.P., Tsvetkov, N.A., Zubkova, O.A. Structure-forming processes of cement composites, modified by sucrose additions (2016) Magazine of Civil Engineering, 66 (6), Pp. 3-11.

Контактная информация

1. +7(812)5341286, ugb@mail.ru (Барабанщиков Юрий Германович, д.т.н., профессор)
2. +7(921)7811957, kvsemenov@bk.ru (Семенов Кирилл Владимирович, к.т.н., доцент)
3. +7(921)3477701, zimin_sergei@mail.ru (Зимин Сергей Сергеевич, старший преподаватель)
4. +7(921)9643762, vatin@mail.ru (Ватин Николай Иванович, д.т.н., профессор)

5.* +7(921)4438710, ksenbor@gmail.com (Борщева Ксения Дмитриевна, студент)

6. +7(981)7567652, Belkina18.1996@gmail.com (Белкина Татьяна Валерьевна, студент)

Contact information

1. +7(812)5341286, ugb@mail.ru (Yuriy Barabanshchikov, Ph.D., Professor)
2. +7(921)7811957, kvsemenov@bk.ru (Kirill Semenov, Ph.D., Associate Professor)
3. +7(921)3477701, zimin_sergei@mail.ru (Sergej Zimin, Senior Lecturer)
4. +7(921)9643762, vatin@mail.ru (Nikolai Vatin, Ph.D., Professor)

5.* +7(921)4438710, ksenbor@gmail.com (Ksenia Borshcheva, Student)

6. +7(981)7567652, Belkina18.1996@gmail.com (Tatyana Belkina, Student)

© Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Зимин С.С., Ватин Н.И., Борщева К.Д., Белкина Т.В., 2018

Барабанщиков Ю.Г., Семенов К.В., Зимин С.С., Ватин Н.И., Борщева К.Д., Белкина Т.В.. Трещиностойкость железобетонной стенки в условиях стесненной основанием температурной деформации // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 8(71). С. 51-62. DOI: 10.18720/CUBS.71.5