

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 669.24'783:539.389.1

АБЗАЕВ ЮРИЙ АФАНАСЬЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,

abzaev@tsuab.ru

ГНЫРЯ АЛЕКСЕЙ ИГНАТЬЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,

tsp_tgasu@mail.ru

КОРОБКОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,

korobkov@hotmail.ru

ТОМРАЧЕВ СЕМЕН АЛЕКСАНДРОВИЧ, канд. техн. наук, доцент,

tomrachev_sa@mail.ru

ГАУСС КСЕНИЯ СЕРГЕЕВНА, аспирант,

gauss.ksyu@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет,

634003, г. Томск, пл. Соляная, 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАДИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУР НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА СТАДИИ ГИДРАТАЦИИ БЕТОНОВ

Приведены результаты математического моделирования и анализ пространственного распределения термических напряжений Мизеса в бетонном образце в зависимости от градиента температур на стадии твердения портландцемента методом конечных элементов в термоупругой области.

В качестве модели был выбран прямоугольный стержень с размерами 10×10×45 см, боковые стенки которого теплоизолировались пеноплексом толщиной 2 см. Одна торцевая грань стержня охлаждалась до $T = 273$ К, а противоположная торцевая грань нагревалась до различных температур: $T = 273, 280, 290, 320, 360$ и 380 К. Расчеты производились с использованием программного комплекса Multi Phisic Comsol.

Анализ расчетов показал, что разница в термических напряжениях в процессе твердения разных внутренних областей бетонов достигает порядка величины, возрастающей с ростом градиента внешнего температурного поля.

Ключевые слова: метод Ритвельда; параметры решетки; кристаллическое строение.

YURI A. ABZAEV, DSc, Professor,

abzaev@tsuab.ru

ALEKSEY I. GNYRYA, DSc, Professor,

tsp_tgasu@mail.ru

SERGEY V. KOROBKOV, PhD, A/Professor,

korobkov@hotmail.ru
SEMEN A. TOMRACHEV, PhD, A/Professor,
tomrachev_sa@mail.ru
KSENIYA S. GAUSS, Research Assistant,
gauss.ksyu@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

MODELING OF TEMPERATURE GRADIENT EFFECT ON STRESS DISTRIBUTION DURING CONCRETE HYDRATION

The paper presents the results of the finite element modeling (FEM) and analysis of thermal Mises stress distribution in a concrete rod depending on the temperature gradient at a stage of Portland cement hardening.

The FEM is represented by a rectangular rod 10×10×45 cm size, the side walls of which are insulated with expanded polystyrene 2 cm thick. One end face of the rod is cooled to $T = 273$ K, while its opposite end face is heated to various temperatures, namely: 273, 280, 290, 320, 360 and 380 K. The computations are carried out using COMSOL Multi-Physics software system.

The analysis shows that the difference in thermal stresses during the hardening of different concrete areas achieves the value that increases with the gradient increase of the external temperature field.

Keywords: Rietveld method; lattice parameters; crystalline structure.

Введение

С момента приготовления водоцементной смеси твердение в бетонах сопровождается работой внутренних тепловых источников вследствие химических реакций. Повышение температуры ускоряет процесс твердения бетонов. Однако в условиях высоких температурных градиентов термические напряжения внутренних областей бетонов могут оказаться вне термоупругой области. Для хрупких материалов (бетоны) верхняя граница упругой области (предел текучести) близка напряжениям разрушения. Торсионная часть энергии деформации, характеризуемая девиаторной частью деформации, определяется напряжениями Мизеса [1–3]. Предположим, что начало неупругой деформации связывается с достижением максимальных сдвиговых напряжений, тогда равенство пределов текучести и напряжений Мизеса бетонов оказывается условием начала развития микротрещин в бетоне. Распределение градиентных температур во внутренних областях цементной смеси и на поверхностях разделов, контактирующих с внешней средой, осложняет картину твердения бетонов, и, следовательно, даже небольшое превышение уровня термоупругой области на этапе твердения стимулирует формирование микротрещин. На практике пространственная плотность и характер распределения микротрещин в областях с высокими температурными градиентами вне упругой области экспериментально сложно контролируется. Моделирование временной зависимости распределения температурных полей и градиентов температур относится к эффективным методам исследования пространственного распределения напряжений Мизеса в зависимости от времени твердения бетонов. Модельная картина набора прочности на стадии твердения позволяет сформу-

лизовать условия твердения бетонов в интервале термоупругости, а также позволяет в рамках связанных задач учесть тепловые потоки, конвекцию и их влияние на распределение напряжений Мизеса, обусловленных разницей температур внутри и на границах раздела фаз бетонных изделий.

Целью настоящей работы является анализ пространственного распределения термических напряжений Мизеса в зависимости от градиента температур на стадии твердения портландцемента методом конечных элементов в термоупругой области.

Описание модели, постановка задачи, материал и методика исследования

На этапе твердения «свежих» бетонов могут возникать термические напряжения, связанные с градиентами температур в материале, обусловленные работой внутренних объемных источников тепла вследствие гидратации, конвекции тепловых потоков на внешних поверхностях материалов. Существенное значение имеет также разница температур на внутренних и внешних поверхностях бетонов, обусловленная особенностями практической эксплуатации. Существенное влияние на внутренние свойства бетонов оказывает также влажность, внешняя конвекция атмосферных потоков. Бетоны представляют собой многофазный капиллярно-пористый материал со сложноорганизованной иерархической структурой [4]. В работе в качестве начальной оценки накопления термопрочности бетоны анализировались в качестве непрерывной среды с эффективными значениями структурных, термомеханических параметров. Бетонные стержни относятся к хрупким материалам, накопление термопрочности образцов на стадии твердения моделируется в упругой области. Пространственное распределение напряжений Мизеса [1, 8] может быть использовано для выявления критических областей (области микроразрушения) после сравнения с пределом текучести. К дополнительным факторам внешнего влияния относится то, что две грани бетонного стержня находятся под различными температурами (рис. 1).

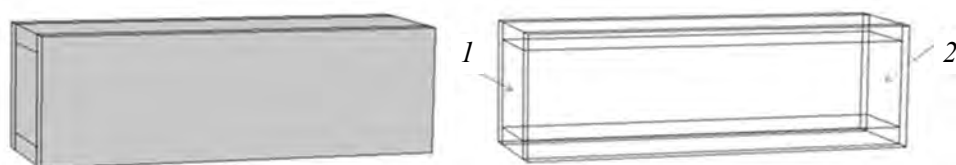


Рис. 1. Прямоугольный бетонный стержень в опалубке

Рассмотрим математическую модель твердения бетона. В настоящей работе для расчетов пространственного распределения температуры использовалось уравнение теплопроводности, учитывающее разницу температур по сечению и временную зависимость разогрева смеси вследствие гидратации:

$$c(T)\rho(T)\partial T/\partial t + \operatorname{div}(\lambda(T)\operatorname{grad}T) = Q(t), \quad (1)$$

где $c(T)$ – удельная массовая теплоемкость; $\rho(T)$ – плотность бетона; t – время; $\lambda(T)$ – теплопроводность; $Q(t)$ – тепловой источник.

Предполагается, что тепловые источники являются стационарными, перемещение источников в материале отсутствует и внешние боковые границы исследуемого материала термоизолированы опалубкой. Временная зависимость тепловыделения в бетоне, обусловленная гидратацией, моделировалась следующей формулой [5]:

$$Q(t) = Q_{28}(1 - \exp^{-1.5t^{2.8}}), \quad (2)$$

где Q_{28} – константа, равная суммарному тепловыделению в течение 28 сут. Константы в формуле (2) соответствуют недельному периоду твердения. Конвекция между опалубкой и окружающей средой не учитывалась. Тепловой источник и приложенное неоднородное температурное поле в смеси являются источниками термических напряжений. Решение уравнения (1) с учетом (2) используется в качестве входных данных для расчетов пространственного распределения термических напряжений. Решение квазистатической задачи (инерционные вклады не учитываются) накопления термоупругой прочности получено на основе потенциала перемещений, в котором учитывается температурный вклад [2]. Поле деформаций определялось по формуле

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{G} \left[\sigma_{ij} - \frac{\mu}{1+\mu} s \delta_{ij} \right] + \alpha(T - T_0), \quad (3)$$

где G – модуль сдвига; σ_{ij} – напряжения; μ – коэффициент Пуассона; α – коэффициент линейного расширения; T_0 – начальная температура; $s = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}$, $ij = x, y, z$. В формулу (3) входит 6 уравнений и 9 неизвестных перемещений. Система (3) замыкается добавлением 3 уравнений равновесия. Из уравнения (3) находятся напряжения по формуле

$$\sigma_{ij} = 2G \left[\varepsilon_{ij} + \frac{\mu}{1-2\mu} e \delta_{ij} - \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha(T - T_0) \delta_{ij} \right]. \quad (4)$$

В формуле (4) была учтена связь между суммой напряжений s и объемным расширением $e = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$, которая равна $e = \frac{1-2\mu}{1+\mu} \left(\frac{s}{2G} \right) + 3\alpha(T - T_0)$.

Подстановка напряжений σ_{ij} в уравнения равновесия $\sum_j (\partial \sigma_{ij} / \partial j) = 0$ приводит к системе 3 уравнений в частных производных

$$\Delta u_i + \frac{\mu}{1-2\mu} \frac{\partial e}{\partial i} - \frac{2(1+\mu)}{1-2\mu} \alpha \frac{\partial T}{\partial i} = 0, (i = x, y, z). \quad (5)$$

Для поиска решения в уравнение (5) записывается потенциал перемещений s , который определяется следующим образом: $u_i = \partial s / \partial i$. Отсюда следует, что $\Delta u_i = \partial(\Delta s) / \partial i$, а объемное расширение $e = \Delta s$. Тогда потенциал перемещений удовлетворяет уравнению Пуассона

$$\Delta s = \frac{1+\mu}{1-2\mu} \alpha(T - T_0).$$

Подстановка решений потенциала перемещений в формулу (4) позволяет найти напряжения по формулам:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{xx} &= -2G \left[\frac{\partial^2 s}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial z^2} \right] & \sigma_{xy} &= 2G \frac{\partial^2 s}{\partial x \partial y}; \\
 \sigma_{yy} &= -2G \left[\frac{\partial^2 s}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial x^2} \right] & \sigma_{yz} &= 2G \frac{\partial^2 s}{\partial y \partial z}; \\
 \sigma_{zz} &= -2G \left[\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} \right] & \sigma_{zx} &= 2G \frac{\partial^2 s}{\partial z \partial x}.
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

В работе исследуется пространственное распределение напряжений Мизеса в бетоне в зависимости от градиента температур посредством формул (6), результаты которых для образца (рис. 1) приведены на рис. 2–7 [6]. На рис. 1 приведен прямоугольный стержень с размерами 10×10×45 см, боковые стенки теплоизолированы пеноплексом толщиной 2 см. Грань 2 стержня (рис. 1) охлаждалась до $T = 273$ К, а грань 1 нагревалась до различных температур: $T = 273, 280, 290, 320, 360$ и 380 К. Фазовые переходы водной компоненты в бетонной смеси вблизи температуры 273 К не учитывались. Бетонный стержень совместно с опалубкой был неподвижно закреплен, также не учитывалось проскальзывание между поверхностями стержня и опалубки в процессе твердения. Температура окружающей среды выбрана равной $T = 293$ К. Конвекция между опалубкой и внешней средой не учитывалась. Структурные параметры пеноплекса и портландцемента были выбраны из базы данных, которые приводятся в комплексах Ansys Workbench и Elcut [7]. Эти данные приведены в таблице.

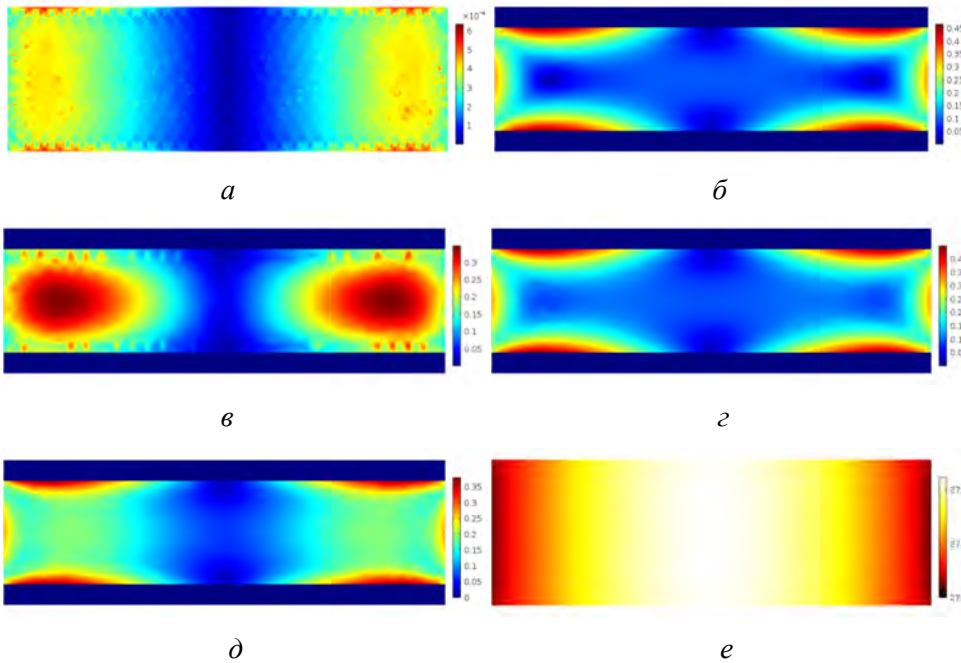


Рис. 2. $T = 273$ К. Распределение напряжений Мизеса в сечениях стержня: 0,1 (а); 0,2 (б); 0,3 (в); 0,4 (г); 0,5 (д); распределение температур (е)

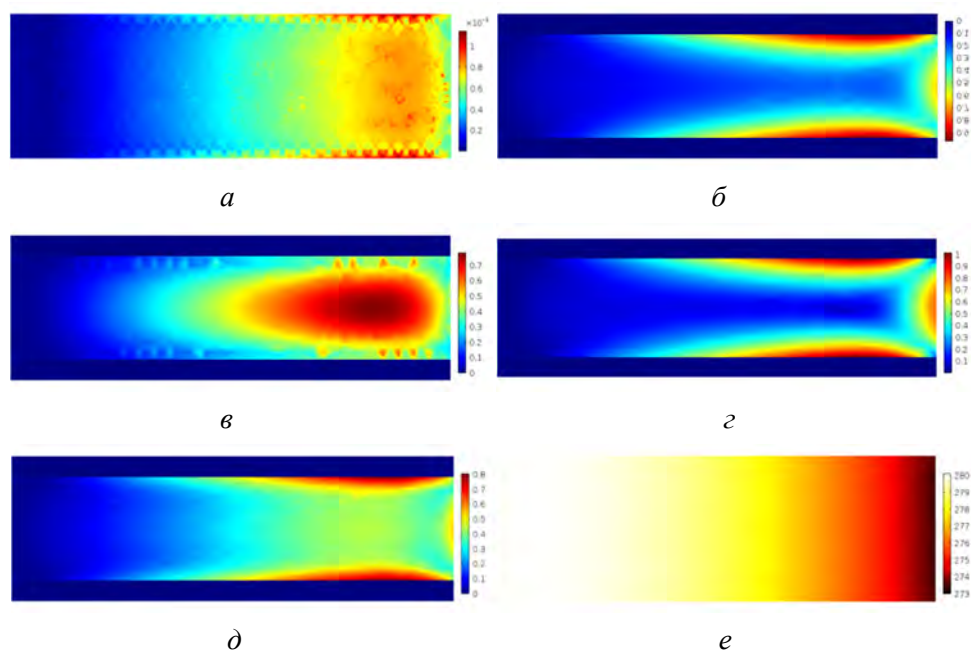


Рис. 3. $T = 280$ К. Распределение напряжений Мизеса в сечениях стержня: 0,1 (а); 0,2 (б); 0,3 (в); 0,4 (г); 0,5 (д); распределение температур (е)

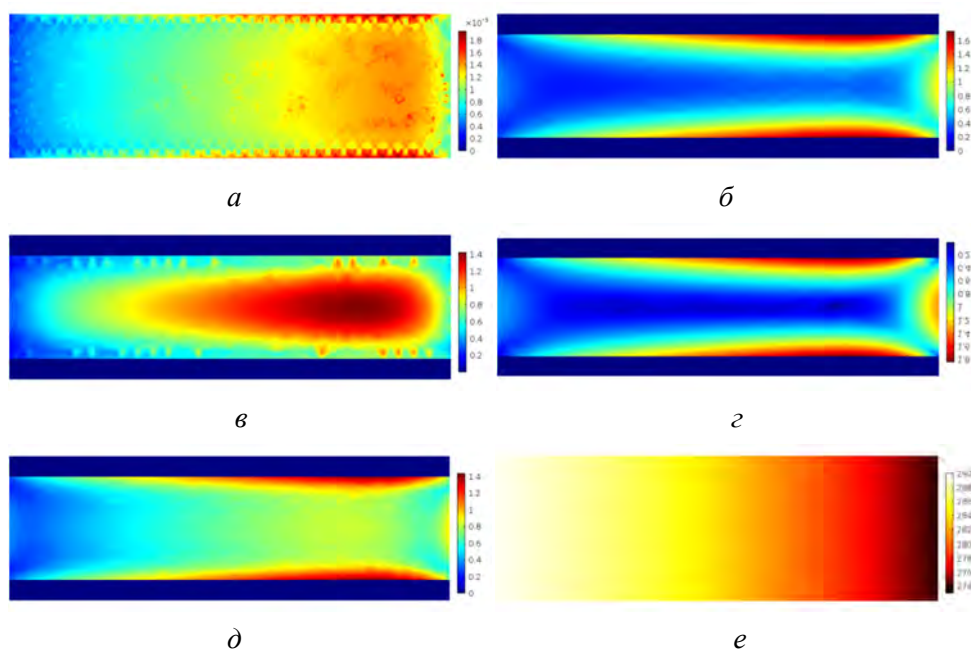


Рис. 4. $T = 290$ К. Распределение напряжений Мизеса в сечениях стержня: 0,1 (а); 0,2 (б); 0,3 (в); 0,4 (г); 0,5 (д); распределение температур (е)

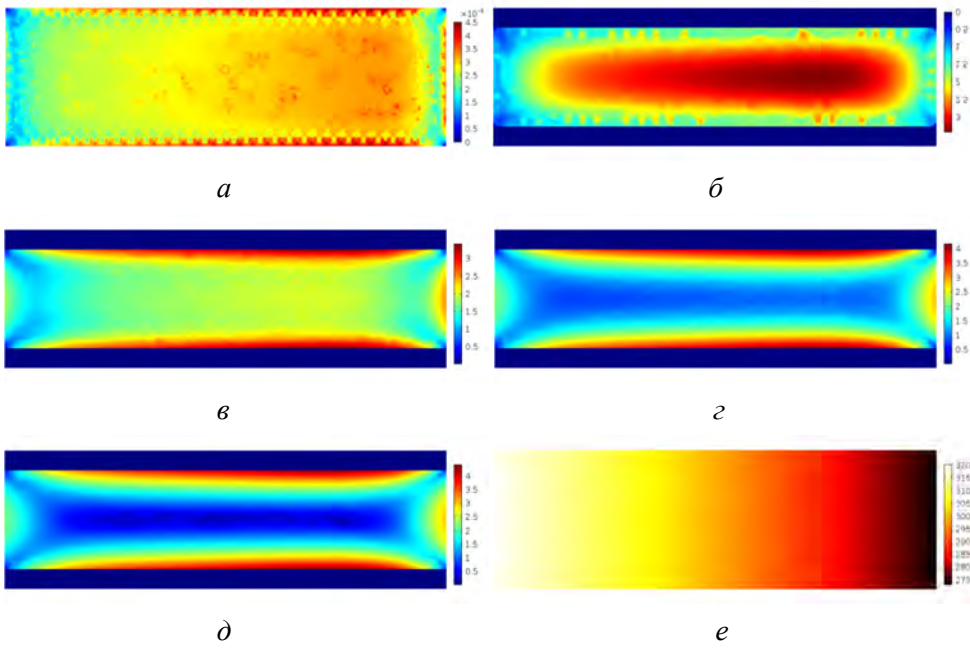


Рис. 5. $T = 320$ К. Распределение напряжений Мизеса в сечениях стержня: 0,1 (а); 0,2 (б); 0,3 (в); 0,4 (г); 0,5 (д); распределение температур (е)

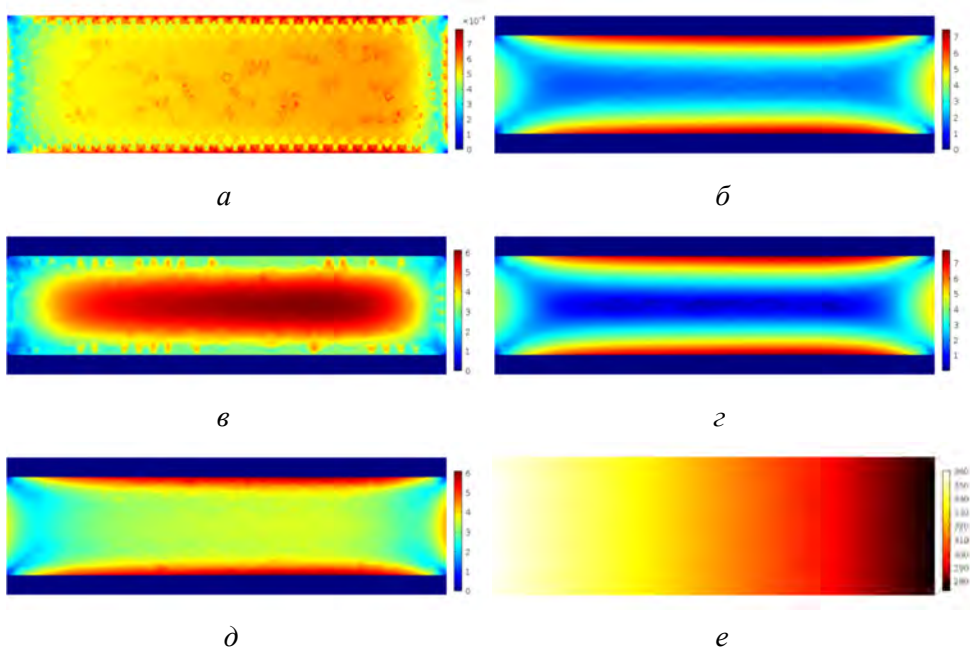


Рис. 6. $T = 360$ К. Распределение напряжений Мизеса в сечениях стержня: 0,1 (а); 0,2 (б); 0,3 (в); 0,4 (г); 0,5 (д); распределение температур (е)

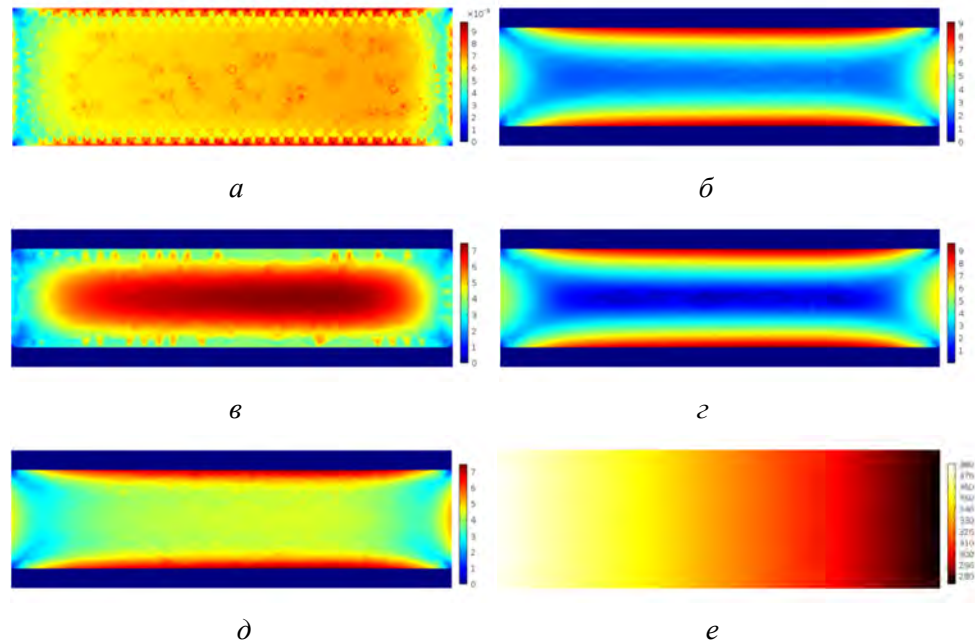


Рис. 7. $T = 380$ К. Распределение напряжений Мизеса в сечениях стержня: 0,1 (а); 0,2 (б); 0,3 (в); 0,4 (г); 0,5 (д); распределение температур (е)

Структурные параметры пеноплекса и портландцемента

Константы	Портландцемент	Пеноплекс
Теплопроводность, В/(м·К)	2,04	0,032
Модуль Юнга, Па	$3,25 \cdot 10^9$	$45 \cdot 10^6$
Коэффициент Пуассона	0,12	0,11
Плотность, кг/м ³	2500	40
Удельная теплота, Дж/(кг·К)	1050	1380
Коэффициент термического расширения, 1/К	$9,8 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-5}$

Обсуждение результатов

Напряжения Мизеса вычисляются по формуле [1, 9]

$$\sigma_M = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right]^{1/2}. \quad (7)$$

Расчеты напряжений производились во временном интервале 0–168 ч с шагом 1 ч. Разное градиентное температурное поле создавалось по следующей схеме: $T = 273, 280, 290, 300, 310, 320, 330, 340, 350, 360, 380$ К. Результаты основной части расчетов приведены на рис. 2–7. На указанных рисунках приведены плоские сечения стержня на относительных расстояниях от боковой грани, которые равны: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5. На каждом рисунке указан

цветовой масштаб величины напряжений Мизеса, которые приведены в мегапаскалях (МПа). Сечение стержня на расстоянии 0,1 соответствует граничной области между бетоном и пеноплексом. На рис. 2–7 видно, что с повышением температуры на грани 1 уровень напряжений возрастает практически на порядок. Распределение напряжения неоднородное.

Напряжения Мизеса максимальны в местах соединения бетонов с опалубкой из-за значительной разницы коэффициентов линейного расширения. При переходе к сечениям от 0,1 до 0,5 уровень напряжений Мизеса существенно возрастает в одинаковых локальных местах, характер распределения напряжений резко меняется. Во внутренних областях бетонов напряжения минимальны, максимальны в местах контактов бетона и опалубки, на гранях 1 и 2 с ростом температуры наблюдаются высокие неоднородные напряжения, в особенности на грани 2 (рис. 7, z , $T = 380$ К), где напряжения достигают величины ~ 7 МПа. На грани 2 вследствие охлаждения наблюдается значительный температурный градиент, и, следовательно, появляются высокие термические напряжения. Термические напряжения варьируются практически на порядок при комнатной (рис. 4, v , z) и повышенных (рис. 5–7, v , z) температурах. На характер распределения термических напряжений в стержне оказывают влияние также граничные области: места стыков опалубки и областей охлаждения, разогрева. С повышением температуры на грани 1 температурные градиенты возрастают, прежде всего, вследствие внутреннего теплового разогрева, поскольку видно (рис. 2–7, e), что температурное поле, создаваемое внешними источниками, монотонно меняется. Сравнение модельных термических напряжений Мизеса с экспериментальными показывает, что их уровень меньше предела текучести, который в среднем равен $\sigma \approx 36$ МПа [9].

Таким образом, анализ термических напряжений в бетонном стержне во внешнем температурном поле на стадии твердения (164 ч) показал: пространственное распределение напряжений Мизеса оказывается в существенной степени неоднородным. На характер распределения напряжений оказывают влияние закрепление опалубки, разница в коэффициентах линейного расширения опалубки и бетона, суперпозиция внешнего температурного поля и температуры, создаваемой работой тепловых источников, места пограничных стыков бетонов. Разница в термических напряжениях в процессе твердения разных внутренних областей бетонов достигает порядка величины, которая возрастает с ростом градиента внешнего температурного поля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Сопротивление материалов* / Г.С. Писаренко, В.А. Агарев, А.Л. Квитка, В.Г. Попков, Э.С. Уманский. – Киев : Вища школа, 1979. – 696 с.
2. Мелан, Э. Термоупругие напряжения, вызываемые стационарными температурными полями / Э. Мелан, Г. Паркус. – М. : Физматгиз, 1958. – 166 с.
3. Рунова, Р.Ф. Анализ термонапряжённого состояния фундаментной плиты и рекомендации по уходу за ней при бетонировании / Р.Ф. Рунова, В.В. Троян. – Условия доступа : <http://beton-profi.ru/matmod.pdf>.
4. Лыков, А.В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах / А.В. Лыков. – М. : Стройиздат, 1954. – 296 с.

5. Лыков, А.В. Теория переноса энергии и вещества / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – Минск : Изд-во АН БССР, 1959. – 330 с.
6. База кристаллографических данных. – Условия доступа : www.comsol.ru/
7. Программный комплекс. – Условия доступа : elcut.ru/
8. Varner, D.J. Analyses of plastic deformation according to von mises' theory with application to the south silverton area, San Juan County Colorado / D.J. Varner. – Washington : United states government printing office, 1962. – P. 109–129.
9. Прочностные характеристики бетонных образцов при повышенных температурах / Ю.А. Абзаев, А.И. Гныря, С.В. Коробков, К.С. Гаусс // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 4. – С. 186–196.

REFERENCES

1. Pisarenko G.S., Agarev V.A., Kvitka A.L., Popkov V.G., Umanskiy E.S. Soprotyvlenie materialov [Strength of materials]. Kiev : Vishcha shkola Publ., 1979. 696 p. (rus)
2. Melan E., Parkus G. Termouprugie napryazheniya, vyzyvaemye statsionarnymi temperaturnymi polyami [Thermoelastic stresses caused by stationary temperature fields]. Moscow : Fizmatgiz Publ., 1958. 166 p. (rus)
3. Runova R.F., Troyan V.V. Analiz termonapryazhennogo sostoyaniya fundamentnoy plity i rekomendatsii po ukhodu za ney pri betonirovanii [Analysis of thermal stress state of base slab and recommendations on its concreting]. Available at: <http://beton-profi.ru/matmod.pdf>. (rus)
4. Lykov A.V. Yavleniya perenosa v kapillyarno-poristykh telakh [Transfer phenomena in capillary-porous bodies]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1954. 296 p. (rus)
5. Lykov A.V., Mikhailov Yu.A. Teoriya perenosa energii i veshchestva [The theory of energy and matter transfer]. Minsk : BSSR Academy of Sciences, 1959. 330 p. (rus)
6. Baza kristallograficheskikh dannykh [Crystallographic database]. Available at: www.comsol.ru/ (rus)
7. Programnyi kompleks [Software system]. Available at: elcut.ru/ (rus)
8. Varner D.J. Analyses of plastic deformation according to von Mises' theory with application to the south Silverton area, San Juan County Colorado. Washington : United States Government Printing Office. 1962. Pp. 109–129.
9. Abzaev Yu.A., Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Tomrachev S.A., Gauss K.S. Prochnostnye kharakteristiki betonnykh obraztsov pri povyshennykh temperaturakh [Strength properties of concrete specimens at high temperatures]. *Vestnik TSUAB*. 2014. No. 4. Pp. 186–196. (rus)