

УДК 691.33

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТРУКТУРНО-ИМИТАЦИОННОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ МАКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

THEORETICAL ASPECTS OF STRUCTURAL AND SIMULATION MODELING OF  
THE MACROSTRUCTURE OF COMPOSITE BUILDING MATERIALS

Адилходжаев А.И., Махаматалиев И.М., Шаумаров С.С.  
Adilhodzhaev A.I. , Mahamataliev I.M., Shaumarov S.S.

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (Ташкент, Узбекистан)  
Tashkent institute of railway engineers (Tashkent, Uzbekistan)

**Аннотация.** В настоящее время описание совместной работы разнородных по свойствам фаз многокомпонентных высококачественных бетонов в рамках структурно-имитационного моделирования цементных композитов является весьма актуальной задачей строительного материаловедения. В контексте решения вышеуказанных задач в данной статье приводятся теоретические аспекты структурно-имитационного моделирования на примере разработанной программы «Бетон-технология», позволяющей прогнозировать прочностные свойства многокомпонентного высококачественного бетона на макроструктурном уровне.

**Ключевые слова:** структурно-имитационное моделирование, композиционные строительные материалы, высококачественный бетон, композит, макроструктура, прочность.

**Дата принятия к публикации:** 15.07.2018  
**Дата публикации:** 25.09.2018

**Сведения об авторах:**

**Адилходжаев Анвар Ишанович** – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта; [anvar\\_1950@mail.ru](mailto:anvar_1950@mail.ru)

**Махаматалиев Иркин Муминович** - кандидат технических наук, профессор кафедры “Строительство зданий и промышленных сооружений” Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта; [erkinmah@mail.com](mailto:erkinmah@mail.com)

**Шаумаров Саид Санатович** – кандидат технических наук, доцент кафедры “Строительство зданий и промышленных сооружений” Ташкентского института инженеров железнодорожного транспорта; [shoumarovss@gmail.com](mailto:shoumarovss@gmail.com)

**Введение.**

Несмотря на определенные достижения в производстве бетонов различного назначения и имеющийся значительный опыт их производства в Узбекистане и за рубежом

**Abstract.** At the present time, the description of the joint work of multi-component, high-quality concretes in the framework of the structural and simulation modeling of cement composites is a very topical task of building materials science. In the context of the solution of the above problems, theoretical aspects of structural and simulation modeling are presented on the example of the developed program "Concrete-technology", which allows to predict the strength properties of multi-component high-quality concrete at the macro structural level.

**Keywords:** structural simulation simulation, composite building materials, high-quality concrete, composite, macrostructure, strength.

**Date of acceptance for publication:** 15.07.2018  
**Date of publication:** 25.09.2018

**Authors' information:**

**Anvar I. Adilkhodjaev** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for scientific work at Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (Uzbekistan); [anvar\\_1950@mail.ru](mailto:anvar_1950@mail.ru)

**Irkin M. Mahamataliev** - Candidate of Technical Sciences, Professor of Department "Construction of buildings and industrial structures" at Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (Uzbekistan); [erkinmah@mail.com](mailto:erkinmah@mail.com)

**Said S. Shaumarov** - Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Department “Construction buildings and structures” at Tashkent Institute of Railway Engineers (Uzbekistan); [shoumarovss@gmail.com](mailto:shoumarovss@gmail.com)

внедрение инновационных технологий в производство сборного и монолитного бетона и железобетона идёт очень медленно. В особенности это касается высококачественных и многокомпонентных бетонов, обеспечиваю-



щих ресурсо- и энергосбережение как в процессе их производства, так и в период эксплуатации. Решение таких сложных задач связано, с одной стороны, с изысканием и расширением сырьевой базы материалов, имеющей свои особенности, оптимизацией составов, разработкой механизмов регулирования вопросов смесеобразования в увязке с технологическими режимами производства, а также с всесторонними исследованиями характера протекания структурных изменений на уровне микро- и макроструктуры и установлении взаимосвязи с физико-механическими и эксплуатационными показателями разрабатываемых материалов, с другой стороны.

Установление корреляционных зависимостей между параметрами формирующейся структуры и свойствами многокомпонентных (5-6-ти, а иногда и более составляющих) бетонов, технологических переделов получения материала с наперёд заданным комплексом свойств является весьма сложной задачей, для решения которой необходимо привлечение нетрадиционных методик, позволяющих охватить весь спектр задач: проектирование состава, исследования закономерностей и характера структурообразования, технологии приготовления, прогнозирования физико-механических и эксплуатационных показателей создаваемого материала. Попытки поиска научно обоснованного решения вышеуказанных задач с использованием неординарных методик привело к разработке и созданию полиструктурной теории композиционных строительных материалов [1, 2].

Полиструктурная теория композиционных строительных материалов как единая система научных представлений о закономерностях структурообразования, технологии и свойствах композиционных материалов строительного назначения получила заслуженное признание в научном мире.

Главная отличительная особенность полиструктурной теории состоит в том, что принцип полиструктурности выступает не только как классификационный фактор или методологический прием для объяснения механизма формирования структуры и свойств материала, но и как ключ к направленному исследо-

ванию возникающих между компонентами химических реакций с целью формирования требуемых физико-технических показателей материала, разработке рациональной технологии изготовления. В рамках полиструктурной теории композиционных строительных материалов впервые четко определены основные структурообразующие факторы для каждого структурного уровня и получены количественные зависимости свойств композитов от этих факторов [2].

Вопросы разработки строительного композита согласно основных постулатов полиструктурной теории композиционных строительных материалов рассматриваются сквозь призму последовательных этапов: физико-химические взаимодействия и превращения протекающие в формирующейся среде с учетом индивидуальных особенностей компонентов, их влияний на ход течения процессов формирования структуры, оптимизации технологических операций изготовления и т.д.

Такая многогранная задача, решение которой направлено на получение «идеального» композита с наперёд заданным комплексом свойств путем обработки большего массива переменных факторов, не может быть реализована обычным тривиальным подходом.

Анализ материалов исследований [3-6], проведенных к настоящему времени, показал, что реализация такой масштабной работы может быть выполнена путем моделирования структуры разрабатываемого композита. Полученные имитационные и виртуальные модели послужат основой для оптимизации физико-механических и технологических параметров проектируемого материала с учетом индивидуальных особенностей исходных компонентов и их объемной концентрации, а использование математического аппарата и современных компьютерных программных комплексов в полной мере обеспечит решение оптимизационных задач путем варьирования большого числа переменных факторов [7, 8].

Моделирование позволяет получить представление о внутренних процессах, протекающих при формировании структуры, установить механизм влияния отдельных элементов на ход течения возникающих взаи-

модействий и объяснить особенности формирования структуры в целом, получить виртуальную картину формирующейся структуры композита [9-14]. В результате появляется возможность производить ранжирование и описание влияния различных внешних и внутренних факторов для формирования требуемых физико-механических, физико-технических и специальных свойств проектируемого материала.

### Структурно-имитационное моделирование макроструктуры многокомпонентного высококачественного бетона.

В контексте вышеуказанных теоретических положений была разработана программа «Бетон-технология», позволяющая прогнозировать прочностные свойства тяжёлого многокомпонентного высококачественного бетона на макроструктурном уровне. Общий вид моделируемого объекта исследования приведен на рис. 1.

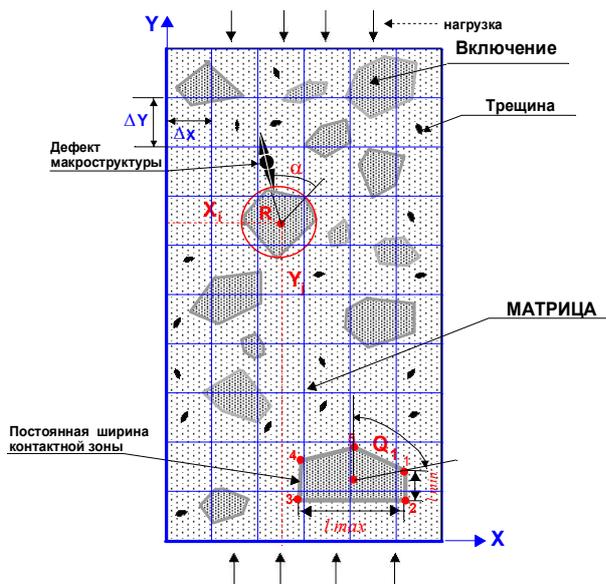


Рис. 1. Моделируемый объект и его структурные компоненты

Как видно из рис. 1, в структуре исследуемого композита различают следующие элементы:

- крупный заполнитель;
- мелкий заполнитель;
- цементный камень;
- воздушные поры;
- различные дефекты.

При моделировании макроструктура бетона условно принята состоящей из двух блоков: крупного заполнителя и цементно-

При моделировании макроструктура бетона условно принята состоящей из двух блоков: крупного заполнителя и цементно-песчаного раствора, а начальные дефекты макроструктуры бетона и его компонентов - с коллинеарными трещинами (рис. 2).

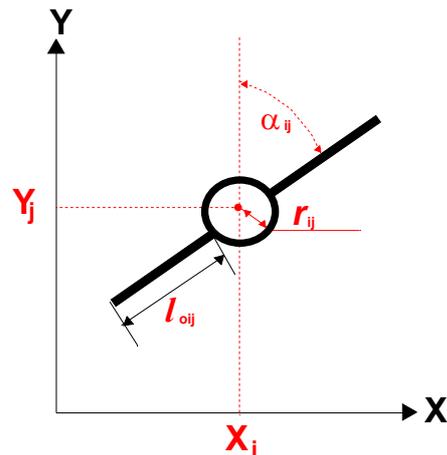


Рис. 2. Геометрические параметры начальных дефектов структуры объекта

При создании модели учитывались следующие геометрические параметры начальных дефектов макроструктуры:

- $r_{ij} = const$  – радиус поры с координатами  $X_i, Y_j$ ;
- $l_{oij}$  – начальная длина трещины, численно равная  $0,184r$ ;
- $\alpha_{ij}$  – ориентация трещины относительно вектора нагрузки (случайная величина, подчиняющаяся закону произвольного распределения в интервале от  $0 \dots 2\pi$ );
- $X_i, Y_j$  - координаты начальных дефектов макроструктуры, являющиеся независимыми случайными величинами, распределенными по равномерному закону по площади пластины (моделируемого образца);
- $N$  – количество начальных дефектов в поле образца ( $N_{min} = 30$ ).

Включения (зерна крупного заполнителя) моделировались выпуклыми многогранниками (рис. 3.) со следующими геометрическими параметрами:

- $R_{ij} = const$  – радиус описанной вокруг многоугольника окружности;

- $n_{ij}$  – число вершин многоугольника ( $n \leq 6$ );
- $\Theta_k^m$  – ориентация  $k$ -ой вершины многоугольника  $M$ -го включения относительно вектора нагрузки (случайная величина, распределенная по равномерному закону на интервале  $0 \dots 2\pi$ );
- $X_i^M, Y_j^M$  – координаты центра описанной окружности  $M$ -го включения;
- $\varphi$  – концентрация включений;
- $K_\Phi$  – коэффициент формы включения.

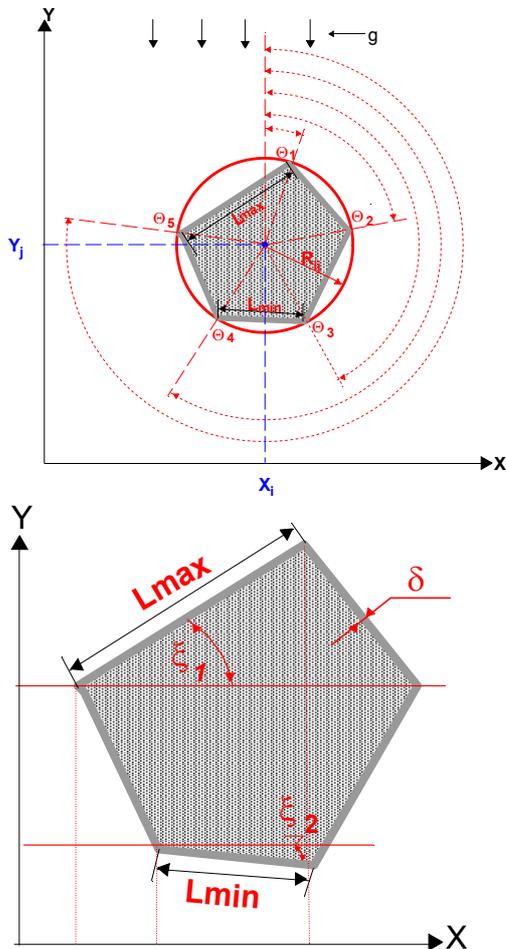


Рис.3. Общий вид включений в моделируемом объекте

Концентрация включений  $\varphi$  определяется по формуле

$$\varphi = \frac{\sum_{m=1}^M S_m^B}{S_{об}}, \quad (1)$$

где  $S_m^B$  – площадь  $M$ -го включения;  $S_{об}$  – площадь образца.

Коэффициент формы  $K_\Phi$  определяется по формуле

$$K_\Phi = \frac{L'_{\max}}{L'_{\min}} = \frac{L_{\max} \cos \xi_1}{L_{\min} \cos \xi_2},$$

где  $L_{\max}, L_{\min}$  – максимальная и минимальная стороны многоугольника включения.

В модели учитывались следующие физические параметры включений:

- $E_g$  – модуль упругости;
- $\mu_g$  – коэффициент Пуассона;
- $K_{Ic}^B$  – коэффициент интенсивности напряжений при нормальном разрыве;
- $K_{Ic}^P$  – коэффициент интенсивности напряжений при плоском сдвиге.

Контактная зона включения (сторона многоугольника включения с заданной шириной  $\delta$ ) является либо постоянной, либо случайной величиной, распределенной по произвольному закону.

Физические параметры включений:

- $K_{Ic}^k$  – критический коэффициент интенсивности напряжений при нормальном разрыве;
- $K_{Ic}^k$  – критический коэффициент интенсивности напряжений при плоском сдвиге принимались прямо пропорциональными аналогичному параметру матрицы:

$$K_{Ic}^k = \Delta_M K_{Ic}^M; \quad (2)$$

$$\Delta_M = \frac{MKT^K}{MKT^M}, \quad (3)$$

где  $MKT^K, MKT^M$  – микротвердость контактной зоны и матрицы соответственно (являются постоянными величинами).

В разработанной модели определяющим источником, вызывающим деформацию матрицы и компонентов бетона, является внешняя нагрузка  $g$ .

При этом объектом анализа деформационных свойств бетона в модели являются:

- слияние изолированных дефектов и их развитие на границе с включениями;
- образование и развитие зигзаг-трещин, возникающих при огибании трещинами включений.

При моделировании на начальном этапе развития трещин (рис.4.) величина внешней нагрузки  $g^*$ , вызывающей развитие двух трещин изолированного начального дефекта макроструктуры, определяется по формуле (индекс  $i$  принимает значения из области матрицы, либо значение из области контактной зоны, либо значение из области включения):

$$q^* = \frac{\sqrt{\pi} V_i K_{Ic_i} \sqrt{a_1 + a_2}}{\varphi(a_{1,2})}. \quad (4)$$

Концентрация включений  $\varphi$  для вершины  $a_2$  (рис.4) составляет:

$$\varphi(a_2) = \int_{-a_1}^{-r} \left( \frac{r^2}{2\xi^2} - \frac{3r^4}{2\xi^4} \right) \sqrt{\frac{a_1 - \xi}{a_2 + \xi}} d\xi \times \\ \times \int_r^{a_2} \left( \frac{r^2}{2\xi^2} - \frac{3r^4}{2\xi^4} \right) \sqrt{\frac{a_1 - \xi}{a_2 + \xi}} d\xi. \quad (5)$$

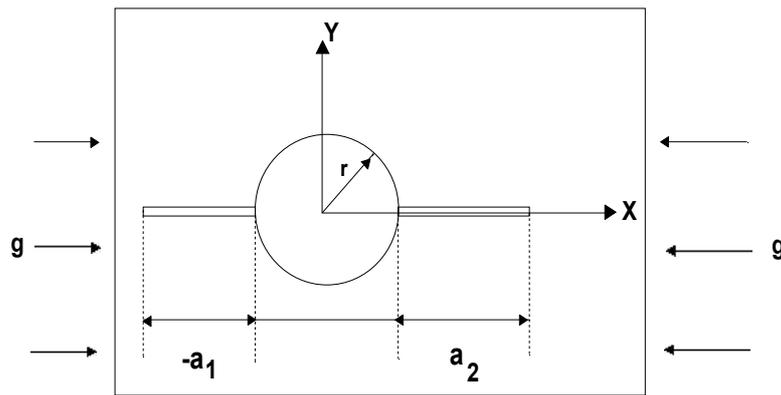


Рис. 4. Начальный дефект макроструктуры бетона и его компонентов

Условие слияния начальных дефектов с различными диаметрами определяется выражением

$$\Psi_1 = \frac{a_i + a_{i-1,i+1}}{2c - (r_i + r_{i-1,i+1})} \geq 0,46. \quad (6)$$

Величина нагрузки, вызывающей развитие  $N$  ( $N > 2$ ) слившихся начальных дефектов макроструктуры бетона или его компонентов (рис.5) описывается уравнением:

- для вершины трещины  $a_N$

$$q_{a_N}^* = \frac{\sqrt{\pi} V_i K_{Ic_i} V_i \sqrt{a_1 + a_N}}{\varphi(a_N)}; \quad (7)$$

- для вершины трещины  $a_1$

$$q_{a_1}^* = \frac{\sqrt{\pi} V_i K_{Ic_i} V_i \sqrt{a_1 + a_N}}{\varphi(a_1)}. \quad (8)$$

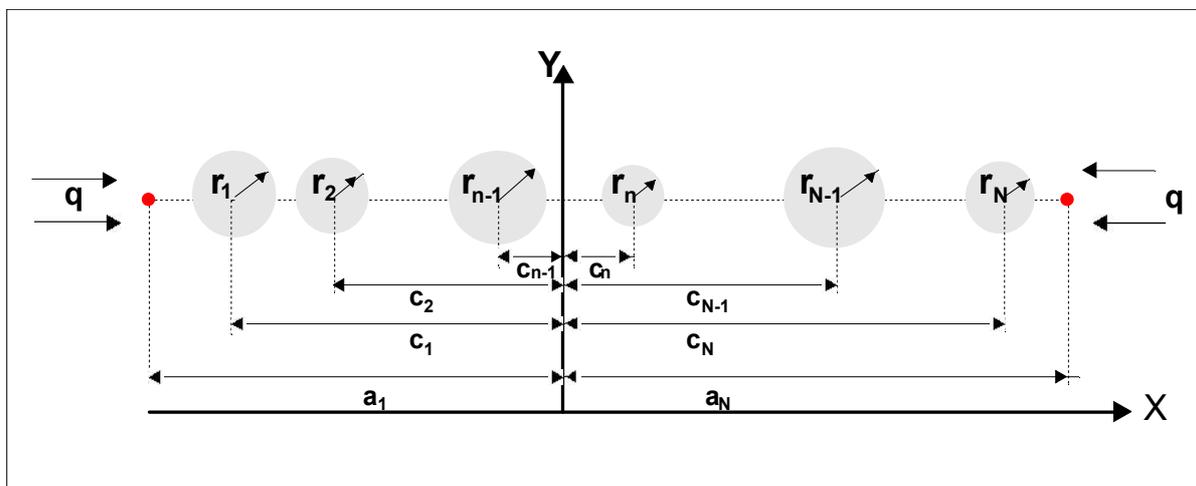


Рис. 5. Геометрические параметры начальных дефектов макроструктуры бетона и его компонентов в процессе слияния

Нагрузка  $q_{a_N}^*$ , способствующая развитию зигзаг-трещины, вычисляется по формулам:

- для вершины трещины  $a_N$

$$q_{a_N}^* = \frac{\sqrt{\pi} K_{Ici} V_i \sqrt{a_1 + a_N}}{\varphi(a_N, b_M)}, \quad (9)$$

- для вершины трещины  $a_1$

$$q_{a_1}^* = \frac{\sqrt{\pi} K_{Iic} V_i \sqrt{a_1 + a_N}}{\varphi(a_1, b_M)}, \quad (10)$$

где

$$\varphi(a_N, b_M) = \varphi(a_N) + \frac{K_{Iic}}{K_{Iic}} \sum_{m=1}^M A_m(\alpha, f, z) \sqrt{\frac{a_N - b_m}{a_N + b_m}}; \quad (11)$$

$$\varphi(a_1, b_M) = \varphi(a_1) + \left( \frac{K_{Iic}}{K_{Iic}} \right) \sum_{i,m=1}^M A_m(\alpha, f, z) \sqrt{\frac{a_1 - b_m}{a_N + b_m}}. \quad (12)$$

Развитие трещины на границе с включением моделируется следующим образом: при выходе трещины на грань включения (контактную зону) с ростом нагрузки  $g$  трещина будет развиваться прямолинейно (через включение) или тормозиться им.

Условие развитие трещины на границе с включением определяется параметром  $\eta$  на основании неравенств:

- трещина огибает включение:  $-\eta \leq I$ ;
- прямолинейное развитие трещины ( $K_I > K_{Ici}$ ):  $-\eta > I$ ;
- остановка трещины контактной зоной включения ( $K_I \leq K_{Ici}$ ):

при выходе трещины из включения в матрицу

$$\eta = 1,15 \frac{K_{Iic}^K}{K_{Ic}^M}; \quad (13)$$

при выходе трещины из матрицы во включение

$$\eta = 1,15 \frac{K_{Iic}^K}{K_{Ic}^B}. \quad (14)$$

Прямолинейное развитие трещины через включение (матрицу) наблюдается, если

$$K_I > K_{Ici}, \quad i = 1, 2, 3.$$

Трещина останавливается на границе с включением, если

$$K_I \leq K_{Ici}, \quad i = 1, 2, 3,$$

где  $K_{Ici}$  - принимается в зависимости от местоположения вершины трещины ( $i \sim B$  – во

включении;  $i \sim M$  – в матрице;  $i \sim K$  – в контактной зоне).

Ккоэффициент интенсивности нормальных разрывающих напряжений у вершины трещины  $K_I$  вычисляется по следующим формулам:

- для вершины трещины  $a_1$

$$K_I = \frac{q \varphi(a_1, b_M)}{V_i \sqrt{\pi(a_1 + a_N)}}; \quad (15)$$

- для вершины трещины  $a_N$

$$K_I = \frac{q \varphi(a_N, b_M)}{V_i \sqrt{\pi(a_1 + a_N)}}. \quad (16)$$

В разработанной структурно-имитационной модели процесса разрушения бетона и его компонентов на уровне макроструктуры формирующиеся взаимодействия между структурными элементами в процессе твердения бетона производятся по вышеуказанным формулам. В качестве дополнительного также принято условие, что трещина развивается параллельно приложенной нагрузке и ее рост прекращается при выходе на другую трещину.

Разработанная модель процесса разрушения цементного бетона и программное обеспечение «Бетон-технология» позволяют проследить эволюцию формирования деструктивных процессов, прогнозировать прочностные свойства тяжёлого бетона на макроструктурном уровне и получать виртуальное изображение динамики распределения напряжений в бетонном образце в процессе увеличения внешней нагрузки  $g$  вплоть до завершающего момента разрушения образца включительно (рис. 6).

#### Заключение.

Графическая визуализация результатов численного моделирования прочности цементного бетона с использованием программного комплекса «Бетон-технология» соответствует существующим представлениям о процессе разрушения цементных композиций и позволяет заключить, что предложенный метод структурно-имитационного моделирования процессов разрушения бетона при одноосном сжатии пригоден для теоретической оценки прочности рассматриваемой системы.

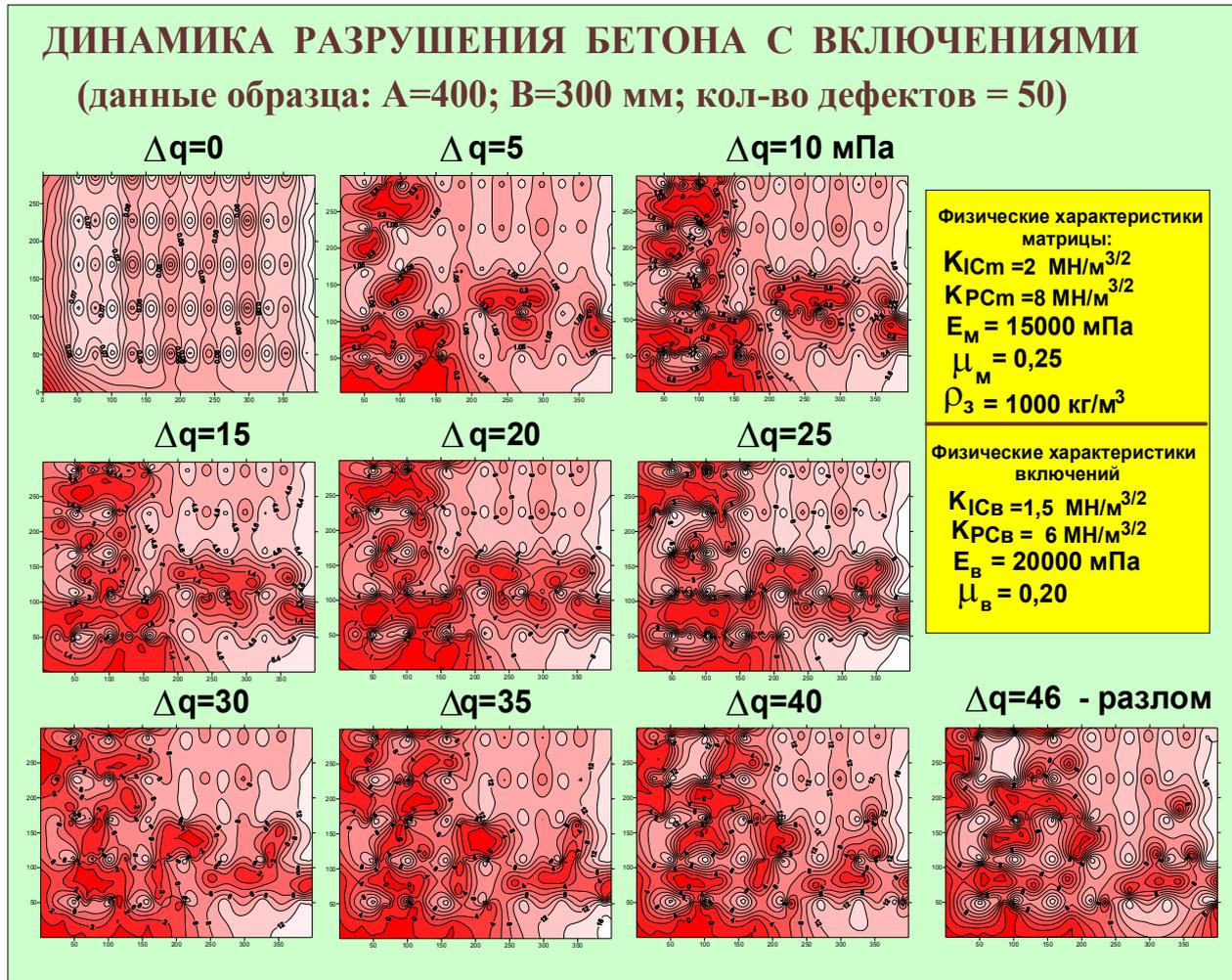


Рис. 6. Графическая визуализация результатов численного моделирования прочности цементного бетона с использованием программного комплекса «Бетон-технология»

### Список литературы

1. Соломатов, В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов. - Ташкент: Фан, 1991. - 345 с.
2. Соломатов, В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов // Изв. вузов. Строительство. - 1985. - № 8. - С.58-64.
3. Баженов, Ю.М. Достижения, проблемы и направления развития теории и практики строительного материаловедения / Ю.М. Баженов // Материалы X Академических чтений РААСН. Пенза, Казань, 2006. - С. 3-7.
4. Баженов, Ю.М. Основные подходы к компьютерному моделированию строительных композитов / Ю.М. Баженов // Строительные материалы. - 2006. - №7. - С. 2-4.

### References

1. Solomatov V.I. Polystructural theory of composite building materials. Tashkent, Fan, 1991. 345 p. (In Russian)
2. Solomatov V.I. Development of the polystructural theory of composite building materials. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*, 1985, No.8, pp. 58-64. (In Russian)
3. Bazhenov Yu.M. Achievements, problems and directions of development of theory and practice of building materials science. *“Materialy X Akademicheskikh chteniy RAASN [Materials of X academic readings of RAASN]”*. Penza, Kazan, 2006, pp. 3-7. (In Russian)
4. Bazhenov Yu.M. Main approaches to computer modeling of building composites. *Stroitelnye materialy*, 2006, No.7, pp. 2-4. (In Russian)

5. Чермашенцев, В.М. Теоретические аспекты компьютерного моделирования эффективных композиционных материалов / В.М. Чермашенцев // Изв. вузов. Строительство. - 2002. - №3. - С. 33-40.
6. Харитонов, А.М. Исследование свойств цементных систем методом структурно-имитационного моделирования / А.М. Харитонов // Строительные материалы. - 2008. - №9. - С. 81-83.
7. Adilkhodjaev, A.I. About nature of interphase interactions of basalt aggregate and polycarboxylate super plasticizer with cement in multi-component concrete / A.I. Adilkhodjaev, I.M. Mahamataliev, V.M. Tsoy // "IBAUSIL" - "19 Internationale Baustofftagung". - Weimar: 2015. - P. 1211-1219.
8. Адилходжаев, А.И. Вопросы управления качеством при проектировании составов многокомпонентных высококачественных бетонов с минеральными наполнителями / А.И. Адилходжаев, И.М. Махаматалиев, В.М. Цой // Вестник ТашГТУ. - 2016. - №1. - С. 252-260.
9. Воробьев, В.А. Основные задачи компьютерного моделирования строительных композитов / В.А. Воробьев // Строительные материалы. - 2006. - №7. - С. 19-21.
10. Воробьев, В.А. Применение физико-математических методов в исследованиях свойств бетона / В.А. Воробьев. - М.: Высшая школа, 1977. - 345 с.
11. Shaumarov, S.S. On the issue of increasing energetic efficiency of buildings in railway transport / S.S. Shaumarov // VIII International Conference "Transport Problems - 2016". - Katowice, 2016. - P. 522-532.
12. Shaumarov, S.S. On peculiarities of formation of the thermal mode in operating panel buildings / S.S. Shaumarov, A.I. Adilhodzhayev, F.F. Karimova // International conference «Science and practice: a new level of integration in the modern world». - London, 2018. P. 365-368.
13. Shaumarov, S.S. On the method of estimation of thermal protective properties of external walls of operating residential buildings / S.S. Shaumarov, A.I. Adilhodzhayev, S.I. Kandakharov // International conference «Student science: research works». Part II. - San Francisco, 2018. P. 103-106.
14. Adylhodzhayev A.I., Shaumarov S.S. The issue of thermal renovation of infrastructure of railway transport is evaluated. X International Scientific Conference "Transport
5. Chermashentsev V.M. Theoretical aspects of computer simulation of effective composite materials. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo*, 2002, No.3, pp. 33-40. (In Russian)
6. Kharitonov A.M. Investigation of the properties of cement systems by the method of structural-simulation simulation. *Stroitelnye materialy*, 2008, No. 9, pp.81-83. (In Russian)
7. Adilkhodjaev A.I., Makhamataliev I.M., Tsoy V.M. About nature of interphase interactions of basalt aggregate and polycarboxylate super plasticizer with cement in multi-component concrete. "IBAUSIL" 19 Internationale Baustofftagung, Weimar, Bundesrepublik Deutschland, 2015, pp.1211-1219.
8. Adilkhodjaev A.I., Mahamataliev I.M., Tsoy V.M. Questions of quality management in the design of multi-component high-quality concretes with mineral fillers. *Vestnik TashGTU*, 2016, No.1, pp. 252-260. (In Russian)
9. Vorobyev V.A. The main tasks of computer modeling of building composites. *Stroitelnye materialy*, 2006, No.7, pp. 19-21. (In Russian)
10. Vorobiev V.A. Application of physical and mathematical methods in studies of concrete properties. Moscow, Vysshaya Shkola, 1977. 345 p. (In Russian)
11. Shaumarov S.S. On the issue of increasing energetic efficiency of buildings in railway transport. VIII International Conference "Transport Problems - 2016". Katowice, Poland, pp. 522-532.
12. Shaumarov S.S., Adilhodzhayev A.I., Karimova F.F. On peculiarities of formation of the thermal mode in operating panel buildings. International conference «Science and practice: a new level of integration in the modern world». London, 2018, pp. 365-368.
13. Shaumarov S.S., Adilhodzhayev A.I., Kandakharov S.I. On the method of estimation of thermal protective properties of external walls of operating residential buildings. International conference «Student science: research works». Part II. San Francisco, California, USA, 2018, pp. 103-106.
14. Adylhodzhayev A.I., Shaumarov S.S. The issue of thermal renovation of infrastructure of railway transport is evaluated. X International Scientific Conference "Transport

- cisco, 2018. - P. 103-106. †
14. Adylhodzayev, A.I. The issue of thermal †  
renovation of infrastructure of railway trans- †  
port is evaluated / A.I. Adylhodzayev, S.S. †  
Shaumarov // X International Scientific Con- †  
ference "Transport Problems - 2018". - Ka- †  
towice, 2018. - P. 13-18. †
- † *Problems - 2018*". Katowice, Poland, 2018, †  
pp. 13-18. †