УДК 539.319

В.И. КОНДРАЩЕНКО, докт. техн. наук, проф.,
В.Д. КУДРЯВЦЕВА, научн. сотрудн.,
А.В. КЕНДЮК, мл. научн. сотрудн., ***А.В. СЕМАК***, інженер,
Московский государственный университет путей сообщения, Россия
Е.В. КОНДРАЩЕНКО, докт. техн. наук, проф.,
Харьковская национальная академия городского хозяйства

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МАКРОСТРУКТУРЫ БЕТОНА

Запропонована імітаційна модель бетону на макрорівні у вигляді двокомпонентної системи, що складається з матриці – цементно-піщаного каменю, і включень – зерен заповнювача, у вигляді опуклих багатокутників. На межі матриці і включень є контактна зона з відмінними від матриці і включень властивостями, а в об'ємі матеріалу (у матриці і включеннях) випадковим чином розташовані початкові дефекти структури – пори різних форм і розмірів. У важкому бетоні дефектністю включень нехтують і відносять її до зони контакту матриці з включеннями.

Предложена имитационная модель бетона на макроуровне в виде двухкомпонентной системы, состоящей из матрицы – цементно-песчаного камня, и включений – зерен заполнителя, в виде выпуклых многоугольников. На границе матрицы и включений имеется контактная зона с отличными от матрицы и включений свойствами, а в объеме материала (в матрице и включениях) случайным образом расположены начальные дефекты структуры – поры различных форм и размеров. В тяжелом бетоне дефектностью включений пренебрегают и относят ее к зоне контакта матрицы с включениями.

The simulation model of concrete is offered on a macrolevel as a double-base system, consisting of matrix – cement-sandy stone, and including - grains of filler, as protuberant polygons. On the border of matrix and including there is a pin area with different from a matrix and including properties, and in the volume of material (in a matrix and including) casual character is locate the initial defects of structure pores of different forms and sizes. In a heavy concrete imperfectness of including is ignored and attribute her to the area of contact of matrix with including.

На современном этапе развития строительного материаловедения значительное место в изучении взаимосвязи структуры со свойствами материала особенностей материала с его свойствами занимает вычислительный эксперимент (*ВЭ*), позволяющий не только сократить продолжительность исследований и повысить их достоверность, но и получить в ряде случаев результаты, трудно достижимые в натурном эксперименте (*НЭ*) [1]. При этом возникает проблема построения достоверной структурно-имитационной модели (*СИ*-модели) материала, отражающей основные особенности его поведения под нагрузкой того или иного рода. В частности, определение наиболее эффективных путей получения высокопрочного бетона на пористых заполнителях может быть выполнено ранжированием параметров макроструктуры бетона по степени их влияния на его прочность путем варьирования в расчетной модели-аналоге бетона по результатам проведения *ВЭ*.

Модель-аналог бетона представляет собой *СИ*-модель, имеющую геометрические (размеры образца, начальных дефектов (*НД*), включений и др.) и физические (модули упругости матрицы, включений, свойства контактной зоны (*к.з.*), и др.) параметры, близкие натурному образцу. В свою очередь образцы бетона и его компонентов на уровне макроструктуры моделируются пластиной единичной толщины, ширина A и высота H которой равны стандартным размерам образцов. Физическими параметрами матрицы бетона являются: модуль упругости $E_м$, коэффициент Пуассона $\mu_м$, критические коэффициенты интенсивности напряжений (*КИН*) при нормальном отрыве $k_{ICм}$ и плоском сдвиге $k_{IICм}$.

НД бетона и его компонентов на уровне макроструктуры – поры, моделируются круглыми отверстиями, на контур которых выходят две коллинеарные трещины, и имеют следующие геометрические параметры: радиус поры $r_д$, начальную длину трещин $l_{0д}$ и их ориентацию $\alpha_д$ относительно нагрузки q, координаты дефектов на пластине $x_д$, $y_д$ и их число $N_д$ (рис. 1).

Рис. 1. Геометрические параметры *НД* макроструктуры бетона *(пояснения в тексте)*

Радиусы *НД* $r_д$ в модели изменяются по заданному закону распределения пор по размерам. Начальная длина трещин $l_{0д}$ фиксирована и составляет $l_{0д} = 0{,}184\ r_д$ [2]. Ориентация *НД* относительно нагрузки q изменяется на интервале от 0 до 2π. Координаты центров *НД* $x_{i\partial}$, $y_{i\partial}$ являются независимыми случайными величинами.

Включения моделируются выпуклыми многоугольниками и имеют следующие геометрические параметры (рис. 2): условный радиус $R_в$, число вершин $n_в$ и их угол $\theta_в$ относительно q, координаты центра $X_в$, $У_в$, концентрацию $\varphi_в$ и коэффициент формы $\kappa_{\varphi в}$ включений, а также физические параметры – модуль упругости $E_в$, коэффициент Пуассона $\mu_в$, критические *КИН* при нормальном отрыве $K_{ICв}$ и плоском сдвиге $K_{IICв}$.

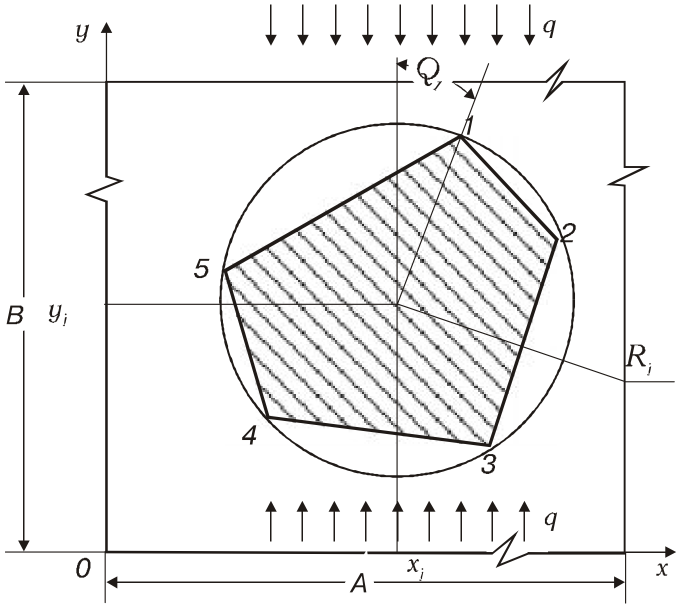


Рис. 2. Геометрические параметры включения *(пояснения в тексте)*

Условный радиус $R_в$, координаты центров $X_в$, $У_в$, число вершин $n_в$ и их ориентация $\theta_в$, коэффициент формы $\kappa_{\varphi в}$ ($\kappa_{\varphi в} = L_{max}/L_{min}$ – рис. 3) включений изменяются случайным образом на интервалах соответственно [$R_{вmin}$; $R_{вmax}$], [A; H] [3;6], [0; 2π] и [$\kappa_{\varphi min}$; $\kappa_{\varphi max}$].

Концентрация включений в бетоне $\varphi_в$ является постоянной величиной. Значения физических параметров включений $E_в$, $\mu_в$, $K_{ICв}$ и $K_{IICв}$ являются случайными величинами, изменяющимися в соответствии с законом распределения средней плотности пористых заполнителей.

Стороны многоугольников моделируют *к.з.* включений. Ее геометрическим параметром является ширина $\delta_к$, а физическими параметрами – критические *КИН* при нормальном отрыве $k_{ICк}$ и плоском сдвиге $k_{IICк}$. Ширина *к.з.* $\delta_к$ (рис. 4) принимает постоянное или случайное значение.

Критические *КИН* для *к.з.* принимаются пропорционально аналогичным параметрам для матрицы – $k_{ICк} = \Delta_м k_{Icм}$ и $k_{IICк} = \Delta_м k_{IIcм}$, где $\Delta_м$ – коэффициент пропорциональности, являющийся случайной величиной и равной отношению микротвердости *к.з.* к микротвердости матрицы.

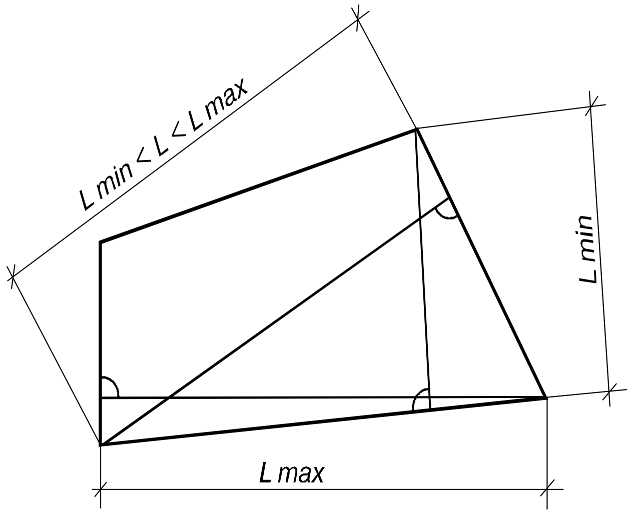


Рис. 3. Схема для определения коэффициента формы включения $к_{\varphi}$

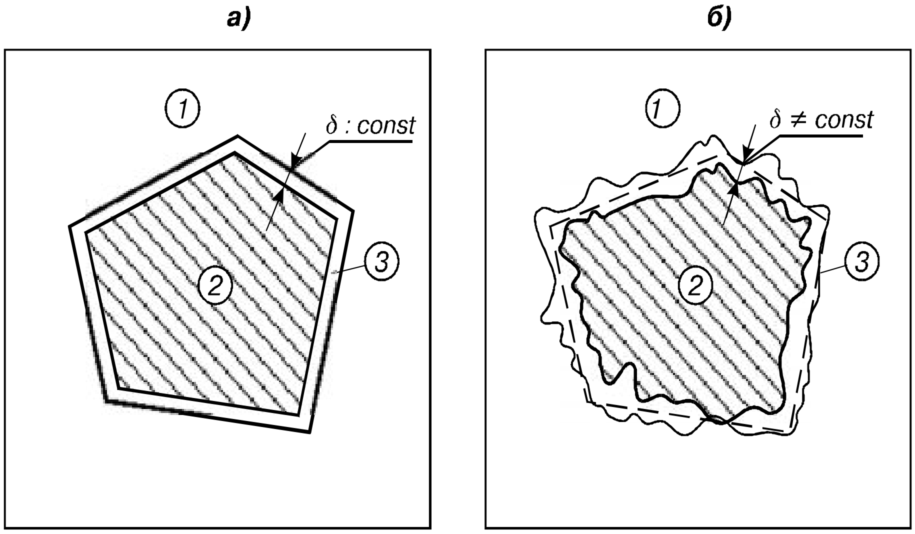


Рис. 4. Включения с постоянной (*а*) и переменной (*б*) шириной *к.з.*:
1 – матрица; 2 – включение; 3 – контактная зона

Таким образом, исходная макроструктура бетона моделируется пластиной единичной толщины (рис. 5), на поверхности которой расположены *НД* и выпуклые многоугольники, стороны которых имитируют *к.з.*, а сами многоугольники – включения (рис. 5 *а*, *б*); для компонентов бетона на поверхности пластины расположены только *НД* макроструктуры (рис. 5 *в*). Статистически независимые геометрические *Г* и физические *Ф* пара-метры макроструктуры бетона и его компонентов характеризуются совместной функцией распределения вероятностей *F(Г, Ф)* или плотностью вероят-ностей *f(Г, Ф)*.

Значения геометрических параметров макроструктуры бетона $Г = Г(r_д, l_{0д}, \alpha_д, x_д, y_д, N_д, R_в, n_в, \theta_в, X_в, У_в, \kappa_{\varphi в}, \delta_к, \Delta_м)$ и его компонентов $Г = Г(r_д, l_{0д}, \alpha_д, x_д, y_д, N_д)$ принимаются постоянными или случайными, отвечающие заданному закону распределения.

Физические параметры в модели бетона $Ф = Ф(М, В, К)$ для матрицы $M = M(E_м, \mu_м, k_{ICм}, k_{IICм})$ являются постоянными, в для включений $В = В(E_в, \mu_в, k_{ICв}, k_{IIсв})$ и *к.з.* $k = k(\Delta_м)$ могут приниматься в зависимости от условий конкретной задачи постоянными или случайными величинами.

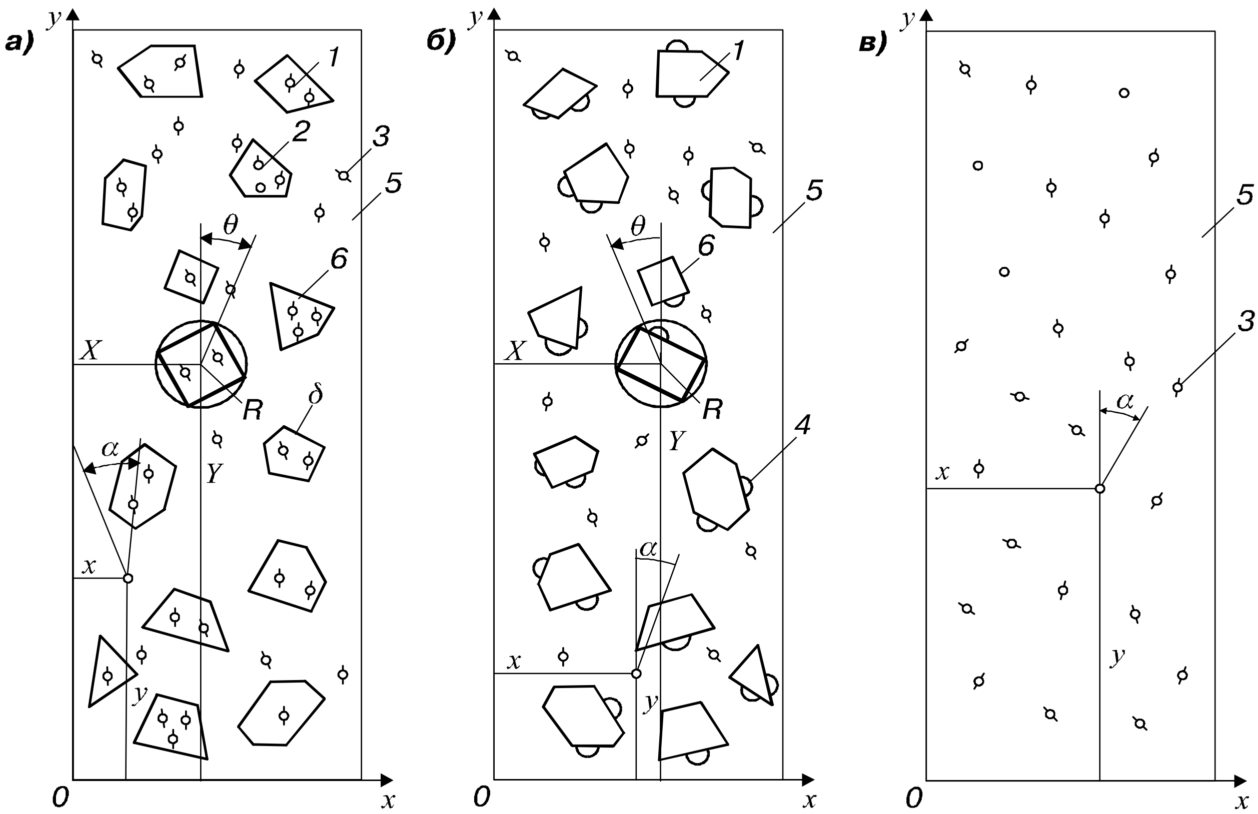


Рис. 5. Модель образцов бетона на пористых (*а*), плотных (*б*) заполнителях и компонентов их макроструктуры (*в*) – заполнителей и матрицы:
1 – включение; 2 – начальный дефект включения; 3 – то же матрицы; 4 – то же контактной зоны; 5 – матрица; 6 – к.з.

Присвоение элементам макроструктуры бетона и его компонентам значений параметров, подчиняющихся произвольному закону распределения, выполняется методом статистических испытаний (методом Монте-Карло).

Для этого кривая распределения, например, параметра *С* (рис. 6 *а*) представляется в виде гистограммы (рис. 6 *б*), которой ставится в соответствие шкала приведенных значений данного моделируемого параметра.

Шкала представляет собой интервал единичной длины, который разделен на отрезки $l_{i-1,i}$ прямо пропорциональные частотам моделируемого параметра C (рис. 6 *в*).

Далее по закону равномерного распределения случайных чисел на этом интервале единичной длины моделируют случайное число t, попадание которого на отрезок шкалы $l^t_{i-1,i}$ определяет значение параметра C^t.

Отметим, что значения моделируемого параметра C могут изначально задаваться не законом распределения, а в виде экспериментально установленной гистограммы распределения.

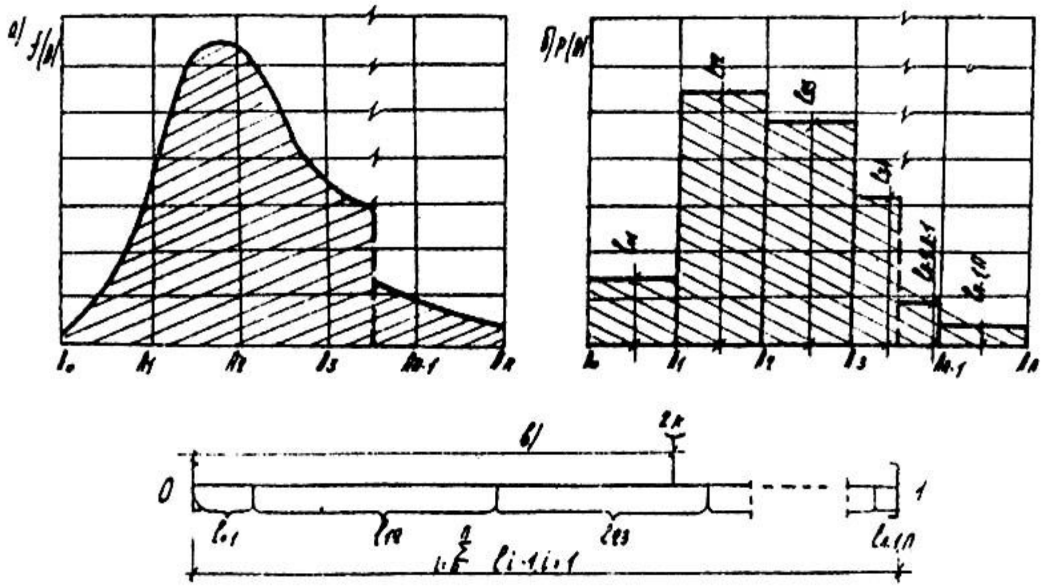


Рис. 6. Схема присвоения значений элементам макроструктуры бетона и его компонентам:
а – кривая распределения значений параметра структуры С; б – то же гистограмма;
в – шкала приведенных значений параметра С

Геометрические характеристики параметров макроструктуры бетона устанавливали проведением *НЭ*. Форму крупного заполнителя – шлаковой пемзы, изучали на аншлифах бетона. Визуальными наблюдениями (рис. 7) было установлено, что практически все (около 96 %) контуры шлаковой пемзы выпуклы и, следовательно, могут быть описаны выпуклыми многоугольниками.

Статистическая обработка результатов четырехсот шестидесяти измерений показала, что 10 % сечений заполнителя могут быть описаны треугольниками, 50 % – четырехугольниками, 30 % – пятиугольниками и 10 % – шестиугольниками. На это соотношение практически не влияет вид, размер и фракционный состав шлаковой пемзы.

Поровое пространство шлаковой пемзы характеризовали двумя показателями – распределением пор по условным диаметрам (диаметром < 0,3 мм – 42 ÷ 49 %, 0,3 ÷ 0,5 мм – 11 ÷ 15 %, 0,5 ÷ 1,0 мм – 21 ÷ 28 %, 1,0 ÷ 2,0 мм – 9 ÷ 14 %, 2,0 ÷ 3,0 мм – 0,1 %, средний диаметр пор 0,55 мм, пористость заполнителя – 28 %) и формой их сечения (содержание пор круглой формы – 28 %, эллиптической – 12 %, прямоугольной – 2 %, квадратной – 0,5 %, треугольной – 4 %, гипоциклоидной с одной вершиной – 14 %, то же с двумя вершинами – 32 %, то же с тремя и более вершинами – 7,5 %) на аншлифе.

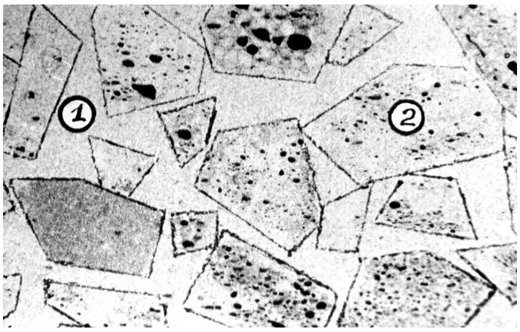


Рис. 7. Аншлиф бетона на пористом заполнителе:
1 – ЦПК; 2 – заполнитель

Аналогичные измерения выполнены для цементно-песчаного камня (*ЦПК*) для распределения пор по условным диаметрам (пор диаметром 1 – 25 мкм – 7,4 ÷ 22,2 %, 25 – 50 мкм – 6,0 ÷ 28,0 %, 50 – 100 мкм – 35,1 ÷ 39,4 %, 100 – 250 мкм – 21,5 ÷ 27,8 %, 250 – 500 мкм – 3,7 ÷ 5,5 %) и форме пор (содержание пор круглой формы – 9 %, эллиптической – 18 %, прямоугольной – 4 %, треугольной – 7 %, гипоциклоидной с одной вершиной – 19 %, то же с двумя вершинами – 24 %, то же с тремя и более вершинами – 19 %).

Из приведенных данных следует, что в основном (свыше 60 %) поры имеют форму окружности или гладкого контура с одним-двумя заостренными углами (типа гипоциклоиды).

Результаты измерений параметров *к.з.* шлаковой пемзы в бетоне показали, что ее ширина составляет в порах 18 – 640 мкм, в межпоровых перегородках – 10 ÷ 5 мкм, а ее прочность на 9 – 40 % выше прочности *ЦПК* и ее параметры зависят как от химической активности поверхности заполнителя, так и от пористости: наличие сравнительно мощного контактного слоя цементного камня в порах шлаковой пемзы объясняется более благоприятными (чем в межпоровых перегородках) условиями гидратации при скоплении в порах поглощенной влаги (рис. 8). При оценке дефектности структуры проведенные исследования показали, что в бетоне на гранитном щебне основная часть дефектов расположена в *ЦПК* и в месте его контакта с плотным заполнителем (рис. 9 а). В отличие от бетона на плотном заполнителе, в легком бетоне с приближением к поверхности пористого заполнителя наблюдается уменьшение пористости (дефектности) матрицы, которая в месте контакта в ультрафиолетовом свете просматривается в виде тонкой полоски, окаймляющей заполнитель. Основным дефектом таких бетонов являются поры, расположенные как в матрице, так и во включениях (рис. 9 б).

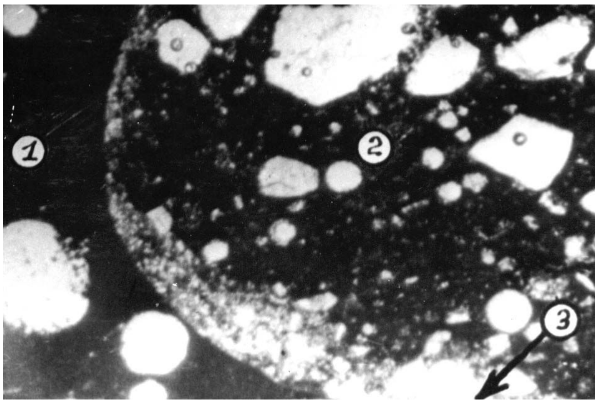
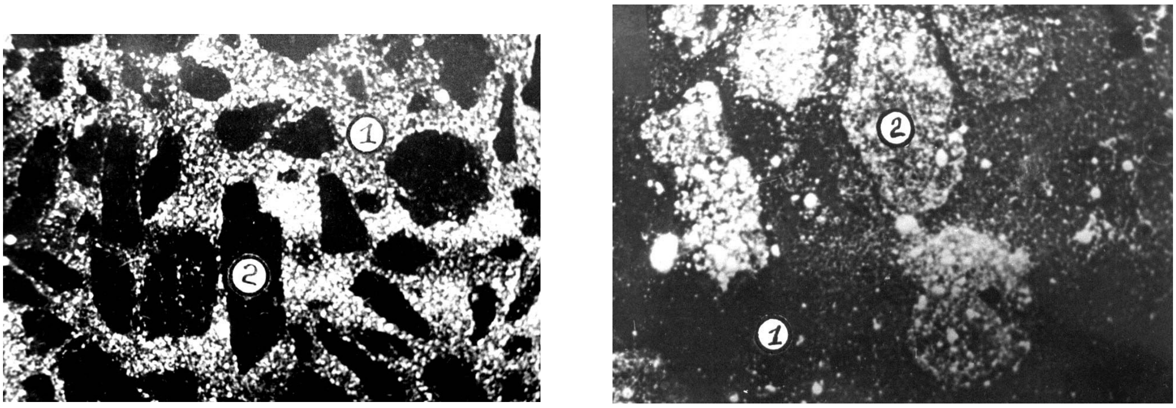


Рис. 8. *К.з.* в бетоне на пористом заполнителе (×25):
1 – заполнитель; 2 – ЦПК; 3 – высокоосновные гидраты кальция



а) б)

Рис. 9. Люминисцентная дефектоскопия тяжелого (а) и легкого (б) бетона:
1 – ЦПК; 2 – заполнитель

Исследования зоны контакта шлаковой пемзы с *ЦПК* также подтверждают положение об отсутствии в ней дефектов, типичных для бетонов на плотных заполнителях. Как правило, из-за химического взаимодействия, визуально зона перехода “матрица-включение” в легком бетоне или трудно различима, или в ней наблюдается плотный контакт, обусловленный силами механического сцепления ввиду низкой химической активности участка шлаковой пемзы, или образование в поре своего рода буфера – скопления высокоосновных гидратов кальция.

Физические характеристики параметров модели бетона удобно представлять в виде полиномиальных моделей “состав – свойства” для *ЦПК* (матрицы) и регрессионных уравнений “средняя плотность – свойства” для шлакопемзового заполнителя (включений).

Математические модели (*ММ*) свойств *ЦПК* устанавливали методами планирования экспериментов с использованием в качестве варьируемых факторов: *С* – объемной концентрации цементного теста в растворе, отн. ед.; $(В/Ц)_{ист}$ – истинного водоцементного отношения, отн. ед., и R_a – активности цемента, МПа. Ниже приведены полученные полиномиальные модели свойств ЦПК при переменных в кодированном масштабе: прочности при сжатии R_M и растяжении R_{ppM}, начального модуля упругости E_M, коэффициента Пуассона μ_M, величины предельных относительных деформаций при сжатии $\varepsilon_{сжM}$, критических *КИН* при нормальном отрыве k_{IcM} и плоском сдвиге k_{IIcM}, угла внутреннего трения ρ_M и коэффициента сцепления k_M:

$$R_M = 30{,}78 + 14{,}42x_1 - 2{,}19x_2 + 4{,}82x_3 - 13{,}36x^2_1 - 2{,}45x_1x_2 + \\ + 3{,}04x_1x_3 + 4{,}99x^2_2 + 0{,}86x^2_3 \text{ (МПа)}; \qquad (1)$$

$$R_{PPM} = 2{,}615 + 1{,}003x_1 - 0{,}447x_2 + 0{,}163x_3 - 0{,}675x^2_1 - \\ - 0{,}236x_1x_2 + 0{,}135x^2_2 - 0{,}025x^2_3 \text{ (МПа)}; \qquad (2)$$

$$E_M \cdot 10^{-4} = 1{,}748 + 0{,}164x_1 - 0{,}221x_2 + 0{,}122x_3 - 0{,}344x^2_1 - \\ - 0{,}026x_1x_2 + 0{,}202x^2_2 - 0{,}124x^2_3 \text{ (МПа)}; \qquad (3)$$

$$\varepsilon_{сжM} \cdot 10^{-5} = 243{,}4 + 99{,}2x_1 - 10{,}5x_2 + 2{,}7x_3 - 46{,}4x^2_1 - 5x_1x_2 - \\ - 14{,}5x_1x_3 + 13{,}1x^2_2 - 5{,}5x_2x_3 + 4{,}18x^2_3 \text{ (отн.ед.)}; \qquad (4)$$

$$\mu_M = 0{,}195 + 0{,}02x_1 - 0{,}015x_2 - 0{,}011x_3 + 0{,}001x^2_1 - 0{,}002x_1x_2 - \\ - 0{,}007x_1x_3 + 0{,}022x^2_2 + 0{,}009x_2x_3 - 0{,}006x^2_3 \text{ (отн.ед.)}; \qquad (5)$$

$$K_{IcM} = 0{,}466 + 0{,}088x_1 - 0{,}082x_2 + 0{,}012x_3 - 0{,}179x^2_1 - 0{,}030x_1x_2 - \\ - 0{,}015x_1x_3 + + 0{,}024x^2_2 + 0{,}037x_2x_3 - 0{,}006x^2_3 \ (МН/м^{3/2}); \qquad (6)$$

$$K_{IIcM} = 8{,}518 + 4{,}548x_1 - 0{,}883x_2 + 1{,}643x_3 - 3{,}268x^2_1 + 0{,}485x_1x_3 + \\ + 1{,}322x^2_2 + 0{,}71x^2_3\ (МН/м^{3/2}); \quad (7)$$

$$\rho_M = 54{,}52 + 5{,}66x_1 - 0{,}18x_2 + 1{,}17x_3 - 3{,}47x^2_1 - 0{,}45x_1x_2 - 0{,}59x_1x_3 + \\ + 2{,}83x^2_2 + 0{,}69x_2x_3 + 4{,}78x^2_3\ (\text{град.}); \quad (8)$$

$$K_M = 5{,}28 + 1{,}95x_1 - 0{,}5x_2 + 0{,}28x_3 - 1{,}95x^2_1 - 0{,}24x_1x_2 + \\ + 0{,}53x^2_2 + 0{,}18x^2_3\ (МПа); \quad (9)$$

ММ свойств включений бетона (шлаковой пемзы), полученные методами корреляционного анализа, приведены на рис. 10 (в числителе) с указанием числа единичных испытаний (в знаменателе).

Критический *КИН* при плоском сдвиге k_{IIc} для шлаковой пемзы определяли по уравнению [3]:

$$k_{IIc_B} = k_{Ic_B} R_{сж\ B} / 2 R_{PPB}\ , \quad (10)$$

после подстановки в которое $k_{Icв}$, $R_{сжB}$ и R_{ppB} окончательно находим:

$$k_{IIc_B} = 0{,}23\rho^{4{,}004}_{m_B} \cdot 10^{-12}\ (\text{МН/м}^{3/2}). \quad (11)$$

На рис. 10 *д* пунктирной линией показана зависимость модуля упругости включений при разрушении $E_B^{пр}$, полученная из уравнения $E_B^{пр} = R_{сжB}/\varepsilon^{пр}_{сжB}$.

Видно, что разница между начальным модулем упругости E_B и $E_B^{пр}$ становится существенной при ρ_{mB} > 1000 кг/м^3 и достигает 27 – 30 %.

Критические *КИН* k_{Ic_B} и k_{IIc_B} характеризуют способность материала сопротивляться распространению в нем соответственно отрывных и сдвиговых трещин. По результатам экспериментов отношение этих коэффициентов k_{IIc_B}/k_{Ic_B} для *ЦПК* составляет более 5 (уравнения 6 и 7), а для шлаковой пемзы – более 2 (оценка нижней границы – рис. 10 *з*), что определяет в основном отрывной механизм распространения трещин в бетоне.

С другой стороны, сравнение критических *КИН* при нормальном разрыве для шлаковой пемзы (рис. 10 *з*) и *ЦПК* (уравнение 6) показывает, что значения такого коэффициента для включений при ρ_{mB} > 1500 кг/м^3 от 2 до 5 раз превышают аналогичный показатель для матрицы.

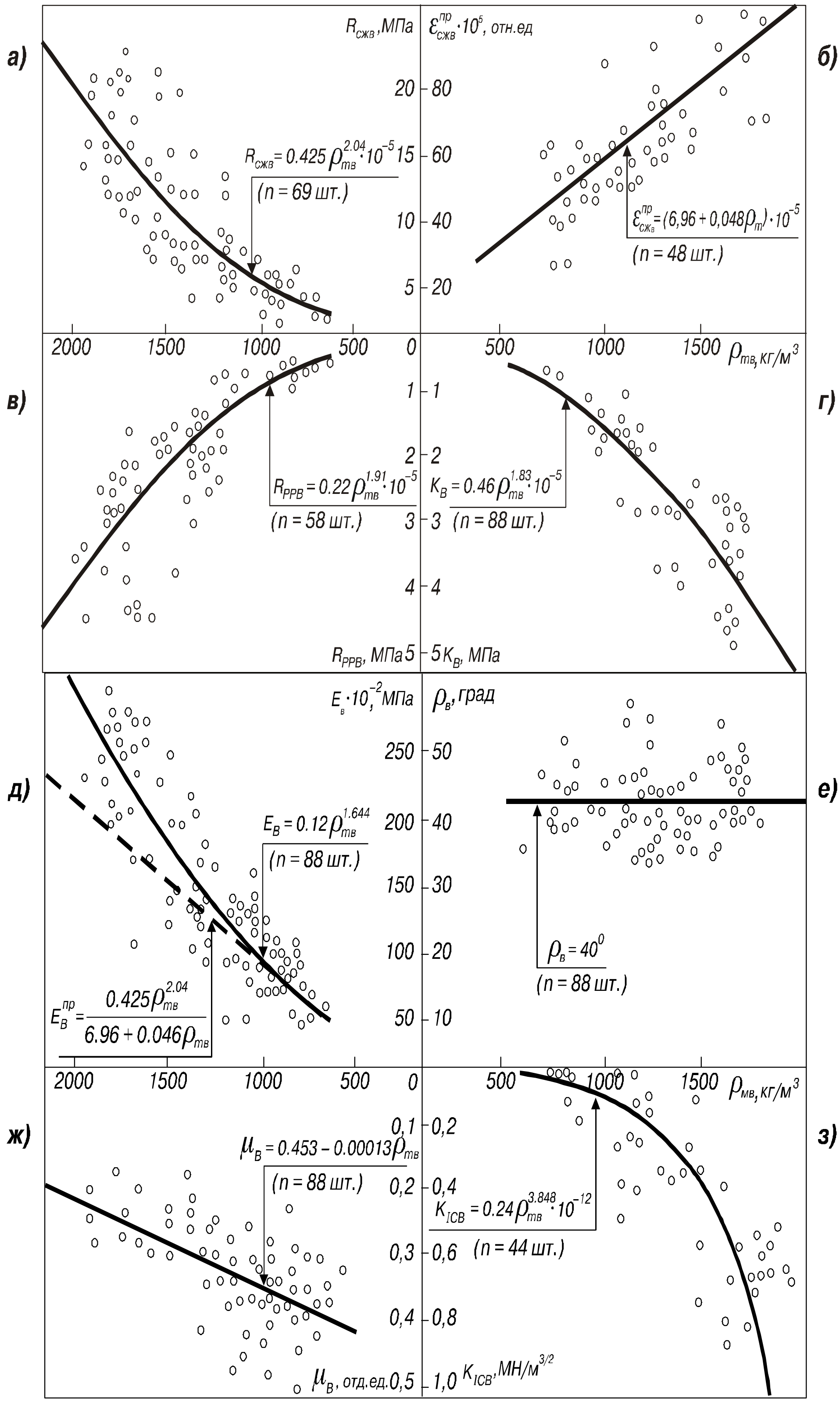


Рис. 10. Зависимость свойств включений от их средней плотности $\rho_{тВ}$:

а – прочность на сжатие; б – предельная сжимаемость;

в – прочность на растяжение при раскалывании; г – коэффициент сцепления;

д – модуль упругости; е – угол внутреннего трения; ж – коэффициент Пуассона;

з – критический коэффициент напряжений при нормальном разрыве.

Следовательно, такие включения, являясь препятствием развивающимся трещинам, будут ими огибаться, что и приводит к образованию зигзаг-трещин.

На основании выполненных экспериментов структуру легкого бетона до приложения нагрузки (в статике) будем представлять в виде двухкомпонентной системы, состоящей из матрицы (*ЦПК*) и включений (зерен пористого заполнителя) – выпуклых многоугольников. На границе матрицы и включений имеется контактная зона с отличными от матрицы и включений свойствами, а в объеме материала случайным образом расположены начальные дефекты структуры – поры различных форм и размеров. В тяжелом бетоне дефектностью включений можно пренебречь, так как она представлена в основном нарушением контакта гранитного щебня с *ЦПК* вследствие седиментационных явлений. Однако под нагрузкой бетон проявляет уже свойства динамичной системы, состояние которой изменяется во времени с момента приложения нагрузки вплоть до разрушения образца. Это обусловлено появлением нового структурного элемента – микро- и макротрещин.

Явления, происходящие под нагрузкой в многократно структурированных динамичных системах, относятся к процессами формирования иерархии структур, в основе которых лежат следующие принципы:

а) при формировании структуры на некотором уровне определяющим является локальное поле напряжений структурного элемента этого уровня и структурного элемента, соответствующего структуре предшествующего уровня;

б) формирование иерархии структур завершается на уровне структуры, неустойчивые элементы которой ограничены естественными границами материальной системы [4].

Исходя из этих положений, процесс разрушения будем моделировать на самом высоком уровне – на уровне макроструктуры бетона с включением структурных элементов данного (матрица, включения, контактная зона, макротрещины) и предшествующего (поля матрицы и включений, микротрещины) уровней. Тогда разрушение бетонного образца будет соответствовать моменту образования неустойчивого структурного элемента – магистральной трещины, выходящей на стороны образца.

При моделировании процессов разрушения бетонный образец рассматривается в виде пластины единичной толщины. При одноосном сжатии это не приводит к существенным погрешностям в сравнении с действительным объемным напряжением состоянием элементов [2]. Кроме того, принятое упрощение позволит использовать для описания напряженного состояния структурных элементов бетона известные решения теории упругости на плоскости [5].

Полученные *ММ* свойств матрицы и включений использовали при формировании расчетной модели-аналога бетона на пористых заполнителях.

В качестве такой модели принята пластина единичной толщины шириной A = 100 мм и высотой H = 400 мм со следующими геометрическими и физическими характеристиками структурных элементов (рис. 5 *а*): количество *НД* структуры N = 50; законы распределения размеров *НД* структуры для матрицы $r_М$ и включений $r_в$, принимаются по таблице; случайные величины координат центров *НД* ($x_д$, $y_д$) и включений ($X_в$, $У_в$) равномерно распределены для $x_д$ и $X_в$ на интервале [$0; A$], а для $y_д$ и $У_в$ – на интервале [$0; H$]; закон распределения размеров включений $R_в$ принимается по таблице; случайные ориентации *НД* $\alpha_д$ и вершин включений $\theta_в$ относительно нагрузки q равномерно распределены соответственно на интервалах [–π/6; π/6] и [0; 2π]; законы распределения числа вершин включений $n_в$ и ширины *к.з.* $\delta_к$ принимаются по таблице; физические характеристики матрицы определяются по *ММ* свойств *ЦПК* (1) – (9) при основном уровне варьируемых факторов: C = 0,625; $(В/Ц)_{ист}$ = 0,23 и R_a = 39 МПа; физические характеристики включений устанавливаем из корреляционных уравнений (рис. 10 и рис.11)) при законе распределения ρ_{mB}, приведенном в таблице (при ρ_{mB} = 1060 кг/м^3 и $\vartheta\rho_{mB}$ = 25 %); относительная величина микротвердости *к.з.* составляет значение $\Delta_М$ = 1,087; коэффициент формы включений $\kappa_{\varphi в}$, подчиняется закону равномерного распределения в интервале [1,2; 1,4]; концентрация включений $\varphi_в$ составляет 0,35.

Геометрические характеристики элементов структуры модели-аналога бетона на пористых заполнителях

Показатели	Ранги/частоты показателей				
$r_М$, мкм	1-25/0,15	25-50/0,17	50-100/0,37	100-250/0,25	250-500/0,06
$r_в$, мм	0,01-0,3/0,5	0,3-0,5/0,13	0,5-1/0,25	1-2/0,09	2-3/0,03
$R_в$, мм	10-15/0,5	15-18/0,3	18-20/0,2	–	–
$n_в$, шт	3/0,1	4/0,5	5/0,3	6/0,1	–
$\delta_к$, мкм	10-50/0,5	50-640/0,5	–	–	–
$\rho_{mB}\cdot10^2$, кг/м^3	6-8/0,22	8-10/0,18	10-12/0,30	12-14/0,18	14-16/0,12

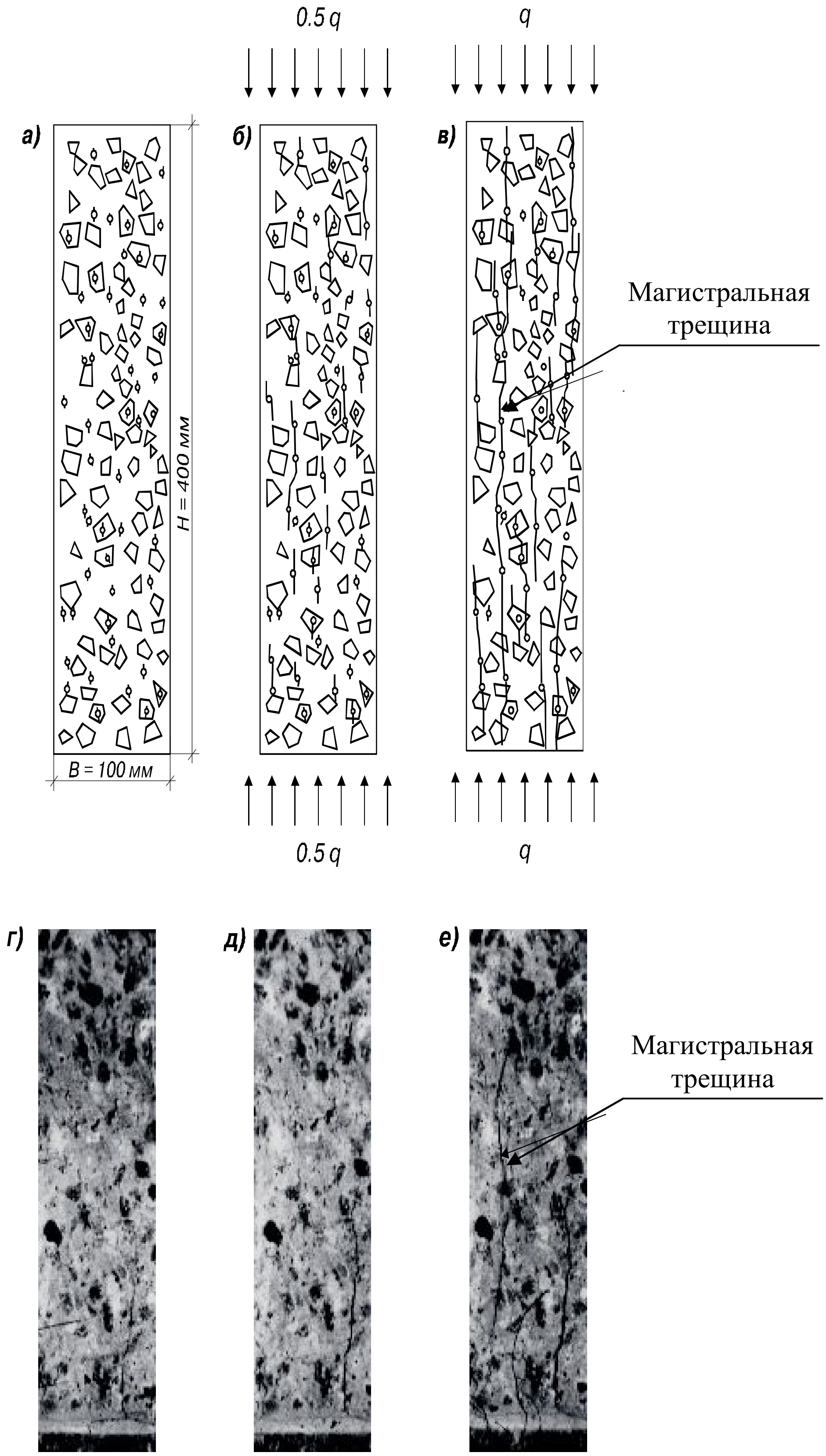


Рис. 11. Разрушение бетона на пористых заполнителях на модели-аналоге (*а* – *в*) и натурном образце (*г* – *е*)

Одна из реализаций развития трещин в модели-аналоге бетона на пористых заполнителях и, для сравнения, в натуральном образце приведена на рис. 11.

Таким образом, предложена имитационная модель бетона в виде двухкомпонентной системы, состоящей из матрицы (*ЦПК*) и включений (зерен пористого заполнителя) – выпуклых многоугольников.

На границе матрицы и включений имеется контактная зона с отличными от матрицы и включений свойствами, а в объеме материала (в матрице и включениях) случайным образом расположены начальные дефекты структуры – поры различных форм и размеров.

В тяжелом бетоне дефектностью включений можно пренебречь и отнести ее к контактной зоне, так как она представлена в основном нарушением контакта гранитного щебня с *ЦПК* вследствие седиментационных явлений, проявляющихся при виброуплотнении бетонной смеси.

Под нагрузкой бетон проявляет свойства динамичной системы, состояние которой изменяется во времени с момента приложения нагрузки вплоть до разрушения образца, что обусловлено появлением нового структурного элемента – микро- и макротрещин.

Тем самым процесс разрушения моделируется на уровне макроструктуры бетона с включением структурных элементов данного (матрица, включения, контактная зона, макротрещины) и предшествующего (поля матрицы и включений, микротрещины) уровней. Тогда разрушение бетонного образца на модели в виде пластины единичной толщины соответствует моменту образования неустойчивого структурного элемента – магистральной трещины, выходящей на стороны образца, представляющих собой естественную границу для данной материальной системы на уровне макроструктуры.

Список литературы: **1.** *Чермашенцев В.М.* Теоретические аспекты компьютерного моделирования эффективных композиционных материалов / *В.М. Чермашенцев* // Известия вузов. Строительство. – 2002. – № 3. – С. 33 – 40. **2.** *Зайцев Ю.В.* Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения / *Ю.В. Зайцев*. – М.: Стройиздат, 1982. – 196 с. **3.** *Черепанов Г.П.* Равновесие откоса с тектонической трещиной / *Г.П. Черепанов* // Прикладная механика и математика. – 1976. – Т. 40, № 1. – С. 136 – 151. **4.** *Гольдштейн Р.В.* Структуры разрушения. Условия формирования. Эшелоны трещин / *Р.В. Гольдштейн, Н.М. Осипенко*. – М.: ИПП АН СССР, 1978. – 59 с. – (Препринт / Институт проблем прочности АН СССР; ИПП АН СССР, 1978-110. **5.** *Мусхелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости / *Н.И. Мусхелишвили*. – М.: Наука, 1966. – 707 с.

Поступила в редколлегию 23.06.10