

### ВЫВОДЫ

1. При увеличении процентного содержания песка и щебня повышается прочность на сжатие и на растяжение при раскалывании. При увеличении содержания песка и уменьшении содержания крупного заполнителя прочность понижается. Для бетона, состоящего только из крупного заполнителя и цемента, прочность снижается в два раза.
2. Увеличение самонапряжения образца сказывается на коэффициенте интенсивности напряжений в сторону его увеличения.
3. Образцы на напрягающем цементе и с применением суперпластификатора С-3 практически не отличались друг от друга ни по прочности, ни по набору самонапряжения

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Драган В.И., Загуляев С.В.. Методика исследования механических свойств материалов с использованием разрывной машины ИР 5145-500-10. // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2002. №1(13). – С. 25-29.
2. Драган В.И., Радзишевский П., Загуляев С.В., Строк М.Н., Влияние накопленных микроповреждений в структуре бетона на его прочностные характеристики // Вестник Брест-

ского государственного технического университета, №1 (19), 2004 г.

3. ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 18с.
4. Е.А.Гузев, С.Н.Леонович, К.А.Пирадов. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики. – Брест: БПИ, 1999. – 217 с.
5. Зайцев Ю.В. Механика разрушения для строителей: Учеб. Пособие для строит. вузов. – М.: Высш. Шк., 1991. – 288 с.
6. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. Пособие: В 4 т./ Под общей ред. Панасюка В.В. – Киев: Наук. Думка, 1988 – ISBN 5-12-000300-1.
7. Проект СТБ. Бетон напрягающий. Технические условия.
8. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах.: Пер. с англ./Под ред. Ю.Мураками. – М.: Мир, 1990. – 1016 с., ил.
9. Тур В.В., Рак Н.А. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций: Монография. – г. Брест; издательство БГТУ, 2003. – 252 с.

УДК 620.17:691.32

*Драган В.И., Загуляев С.В.*

## ВЛИЯНИЕ СОСТАВА БЕТОНА, ОБЪЕМНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАПОЛНИТЕЛЯ НА ВЯЗКОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРЯГАЮЩЕГО БЕТОНА

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время на основе экспериментальных данных и развитых представлений о строении материалов установлен ряд зависимостей между их основными свойствами и наиболее существенными факторами, которые используются в технологических расчетах для отыскания приближенных оценок. В этом отношении можно отметить цементные бетоны, которые благодаря многолетним и многочисленным исследованиям оказались наиболее полно изученными. Однако влияние самонапряжения напрягающего бетона, его состава на трещиностойкость, вязкость разрушения недостаточно полно изучено. Поэтому проведение планового эксперимента представляется лучшим решением для количественного описания этих зависимостей. Существенно облегчается задача определения долговечности, трещиностойкости конструкций.

В данной работе исследованы структурных параметров напрягающего бетона, влияние их на долговечность, физико-механические характеристики и параметры трещиностойкости было изучено при помощи планового эксперимента. Нами был выбран план эксперимента для полиномиальных моделей первого порядка. В качестве параметров оптимизации были выбраны следующие получаемые из эксперимента характеристики:  $K_{IC}$ ,  $G_i$ ,  $f_{ct}$ ,  $f_c$ ,  $E_b$  ( $K_{IC}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений при деформациях нормального отрыва;  $G_i$  – удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины;  $f_{ct}$  – прочность бетона при растяжении;  $f_c$  – прочность бетона при сжатии). В качестве факторов варьирования были выбраны 5 независимых характеристик напрягающего бетона: 1) вид напрягающего цемента –  $N$ , 2) максимальный размер крупного заполнителя –  $d_{max}$ , 3) объемная концентрация заполнителя

–  $V$ , 4) водоцементное отношение –  $В/Ц$ , 5) соотношение крупного и мелкого заполнителя –  $T$ .

С учетом вышеизложенного, для определения зависимости коэффициента интенсивности напряжений от варьируемых факторов был выбран насыщенный пятифакторный двухуровневый план со следующими характеристиками: число независимых переменных – 5; число неизвестных параметров – 16; число наблюдений в плане – 16.

### 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Составы бетонов, подобранных в соответствии с матрицей планирования эксперимента, приведены в таблице 1. Некоторые из составов в практике строительства не применяются. Это были жесткие и литые смеси. Однако сужение интервалов варьирования привело бы к уменьшению области определения полученных моделей.

В качестве вяжущего в поставленном эксперименте использовался напрягающий цемент различной энергоактивности. Химический состав цемента:  $SiO_2$  – 22,14%;  $Al_2O_3$  – 4,46%;  $Fe_2O_3$  – 4,84%;  $CaO$  – 65,35%;  $MgO$  – 1,74%;  $SO_3$  – 2,03%. Соотношение ПЦ:ГЦ:Гипс=76:14:10 (%) для НЦ-4 и ПЦ:ГЦ:Гипс=84:9:7 (%) для НЦ-1.  $S_{уд}$ =4400 см<sup>2</sup>/г,  $K_{н.з}$ =0,28. В качестве крупного заполнителя применялся гранитный щебень крупностью до 20 мм по ГОСТ 8267-93. Мелкий заполнитель – песок кварцевый по ГОСТ 6139-91.

Образцы твердели первые сутки в воздушно-сухих условиях, до 28 суток в воде при  $t=20\div 24^\circ C$ ,  $w=100\%$ .

Образцы имели инициирующую кольцевую трещину (для испытания на осевое растяжение) и без инициирующей трещины (для испытания на растяжение при раскалывании). Кольцевой концентратор представлял собой металлическое кольцо, устанавливаемое в процессе бетонирования. Для предотвращения соприкосновения концентратора с бетоном, кольцо смазывалось отработанным маслом перед бетонированием.

Таблица 1. Составы бетонов, подобранных в соответствии с матрицей планирования

| Состав | Вид вяжущего | $d_{\max}$ , мм | Объемная концентрация заполнителя | Расход материалов, кг/м <sup>3</sup> |       |        |      |
|--------|--------------|-----------------|-----------------------------------|--------------------------------------|-------|--------|------|
|        |              |                 |                                   | цемент                               | песок | щебень | вода |
| 1      | 2            | 3               | 4                                 | 5                                    | 6     | 7      | 8    |
| 1      | НЦ-4         | 20              | 0,7                               | 457                                  | 775   | 1085   | 183  |
| 2      | НЦ-1         | 10              | 0,5                               | 867                                  | 665   | 665    | 303  |
| 3      | НЦ-4         | 20              | 0,7                               | 457                                  | 930   | 930    | 183  |
| 4      | НЦ-1         | 10              | 0,5                               | 867                                  | 555   | 775    | 303  |
| 5      | НЦ-4         | 10              | 0,7                               | 457                                  | 775   | 1085   | 183  |
| 6      | НЦ-1         | 20              | 0,5                               | 867                                  | 665   | 665    | 303  |
| 7      | НЦ-4         | 20              | 0,7                               | 474                                  | 930   | 930    | 166  |
| 8      | НЦ-1         | 10              | 0,5                               | 835                                  | 555   | 775    | 335  |
| 9      | НЦ-4         | 20              | 0,5                               | 835                                  | 665   | 665    | 335  |
| 10     | НЦ-1         | 10              | 0,7                               | 474                                  | 775   | 1085   | 166  |
| 11     | НЦ-4         | 10              | 0,7                               | 457                                  | 930   | 930    | 183  |
| 12     | НЦ-1         | 20              | 0,5                               | 867                                  | 555   | 775    | 303  |
| 13     | НЦ-4         | 10              | 0,7                               | 474                                  | 775   | 1085   | 166  |
| 14     | НЦ-1         | 20              | 0,5                               | 835                                  | 665   | 665    | 335  |
| 15     | НЦ-1         | 20              | 0,5                               | 835                                  | 555   | 775    | 335  |
| 16     | НЦ-4         | 10              | 0,7                               | 474                                  | 930   | 930    | 166  |

Приготовление бетона осуществлялось вручную, бетон уплотнялся на виброплощадке в металлических разборных формах. Образцы распалубивались на вторые сутки после бетонирования.

Бетонные цилиндры с размерами  $\varnothing 100 \times 200$  и кубы с ребром 100 мм были испытаны на статическое разрушение на разрывной машине ИР 5145-500-11

Кубиковая прочность бетона определялась в соответствии с ГОСТ 26633, СТБ1310. Опытные данные получены в возрасте 28 суток по результатам испытаний 6 кубов с ребром 100 мм. После вычисления средних прочностных и деформативных характеристик бетона, полученных при статическом нагружении, были проведены следующие исследования: на растяжение при раскалывании и на осевое растяжение (таблица 2).

Прочность на растяжении при раскалывании определялась в соответствии с [5]

Прочность на скалывание рассчитывалась по формуле

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot P_n}{\pi \cdot D \cdot l}, \quad (1)$$

где  $P_n$  - разрушающая нагрузка,

$D, l$  - соответственно диаметр и длина образца.

Прочность на растяжении определяется по формуле

$$f_{ct,ax} = 0.9 \cdot f_{ct,sp}. \quad (2)$$

Коэффициент интенсивности напряжений (таблица 2) определялся:

1) по формулам [4]

$$K_{IC}'' = F_I''' \sigma_n \sqrt{\pi d c / D}, \quad (3)$$

где

$$F_I''' = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{2} \lambda + \frac{3}{8} \lambda^2 - 0.363 \lambda^3 + 0.731 \lambda^4 \right) \times$$

$$\times \left[ 1 + 0.1 \left( \frac{2c}{D} \right)^{1/2} \left( 1 - \frac{2c}{D} \right)^2 \right],$$

$$\lambda = \frac{d}{D}, \quad c = \frac{D-d}{2}, \quad d = 80 \text{ мм}, \quad D = 100 \text{ мм},$$

$c = 10 \text{ мм}$ ,  $F_I'''$  - безразмерный коэффициент интенсивности напряжений (рис.3);

2) методом податливости

$$K_{IC}' = \sqrt{E \cdot G_{IC}}, \quad (4)$$

где  $G_{IC} = \frac{d\lambda}{dA} \cdot \frac{P^2}{2}$  - упругая энергия разрушения;

$P$  - разрушающая нагрузка, Н;

$A$  - площадь концентратора, м<sup>2</sup>;

$\lambda = \frac{\Delta l}{P}$  - коэффициент податливости;

$\Delta l$  - максимальные деформации бетона в момент старта магистральной трещины.

## 2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

По результатам факторного эксперимента были получены зависимости коэффициента интенсивности напряжений от прочностных характеристик (рис. 1, 2, 3, 4).

На рис.1. представлена зависимость коэффициента интенсивности напряжений от кубиковой прочности. Установлена линейная зависимость увеличения КИН с увеличением прочности.

После реализации матрицы планирования были получены физико-механические и энергетические характеристики бетонов 16 составов, представленные в таблице 2.

Зависимость коэффициента интенсивности напряжений будем описывать уравнением (5):

$$K_{IC} = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5. \quad (5)$$

При испытаниях на раскалывание по методике [5] также была получена линейная зависимость увеличения КИН при увеличении прочности на растяжение.

В таблице 2 представлены результаты эксперимента:  $f_c$  - прочность бетона при сжатии,  $f_{ct,ax}$  - прочность бетона на осевое растяжение (при раскалывании),  $f_{ct}$  - прочность бетона на осевое растяжение. В таблице 2 также представлены результаты определения коэффициента интенсивности напряжений по формулам (3), (4).

Проанализировав таблицу 2, приходим к заключению, что КИН, рассчитанный по формуле (1), имеет определенный запас, составляющий 20-40% по сравнению с методом податливости, что позволяет использовать его для расчета бетонных и железобетонных конструкций. Разброс данных по коэффициентам

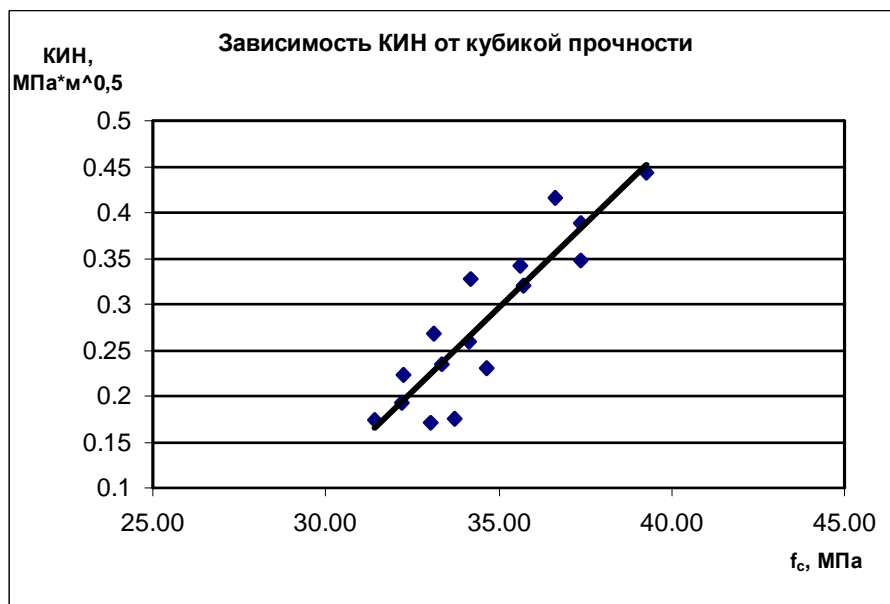


Рис.1. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений напрягающего бетона от кубической прочности

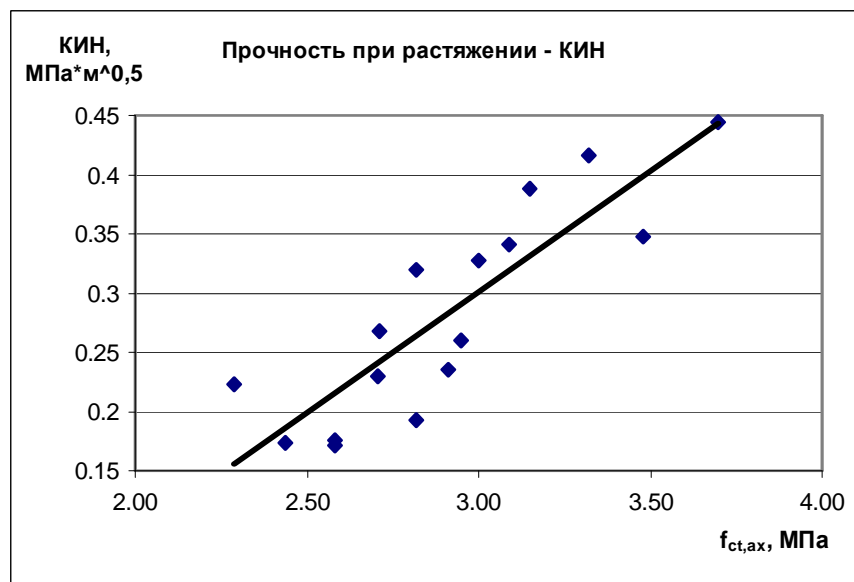


Рис.2. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений напрягающего бетона от кубической прочности

интенсивности напряжений (отношение максимального значения к минимальному значению) составляет 2,5-3 раз, что свидетельствует об удовлетворительном планировании опыта. Разница значений  $f_{ct,ax}$  и  $f_{ct}$  составляет 5-10%. Причина различия  $f_{ct,ax}$  и  $f_{ct}$  видится в том, что они определялись по разным методикам.  $f_{ct,ax}$  определялась косвенным методом. Проводились испытания на раскалывание, а затем по формулам (1, 2) определялся предел прочности на растяжение. Величина  $f_{ct}$  определялась при испытаниях на осевое растяжение.

На рис. 3. представлена диаграмма зависимости коэффициента интенсивности напряжений, рассчитанного по формуле (3), от прочности на осевое растяжение. С увеличением прочности на растяжение, коэффициент интенсивности напряжений нелинейно возрастает.

По результатам статистической обработки результатов определено, что с увеличением  $K_{IC}$  увеличивается стандарт-

ное отклонение  $\sigma^2$ . При анализе плотности нормального распределения обнаружилось, что с уменьшением объемной концентрации заполнителя и увеличением водоцементного отношения стандартное отклонение увеличивается. Применение напрягающего цемента НЦ-1 увеличивает математическое ожидание и уменьшает  $\sigma^2$ . Обобщив полученные результаты, приходим к выводу, что с уменьшением прочности образцов стандартное отклонение уменьшается, а математическое ожидание увеличивается, и, соответственно, наоборот, с увеличением прочности образцов стандартное отклонение увеличивается, а математическое ожидание уменьшается. Статистическая обработка показала увеличение математического ожидания до максимальных значений прочности на растяжение 2-2,5 МПа. Далее математическое ожидание достигает максимального значения после чего стандартное отклонение увеличивается. Для определения характеристик трещиностойкости при прочности на растяжение менее 2,5 МПа требуется меньшее количество образцов, чем при

Таблица 2. Прочностные характеристики бетонов на напрягающем цементе

| Серия | $f_c$ , МПа | $f_{ct,ax}$ , МПа | $f_{ct}$ , МПа | $K_{IC}''$ , МПа·м <sup>0,5</sup> | $K_{IC}'$ , МПа·м <sup>0,5</sup> | $\frac{K_{IC}' - K_{IC}''}{K_{IC}'} \cdot 100\%$ |
|-------|-------------|-------------------|----------------|-----------------------------------|----------------------------------|--|
| 1     | 34,13       | 2,95              | 2,54           | 0,260                             | 0,336                            | 22,62  |
| 2     | 35,64       | 3,09              | 2,94           | 0,341                             | 0,414                            | 17,63  |
| 3     | 33,13       | 2,71              | 2,38           | 0,268                             | 0,360                            | 25,56  |
| 4     | 35,70       | 2,82              | 2,51           | 0,320                             | 0,451                            | 29,05  |
| 5     | 31,44       | 2,44              | 2,18           | 0,174                             | 0,290                            | 40,00  |
| 6     | 37,39       | 3,48              | 3,17           | 0,348                             | 0,506                            | 31,23  |
| 7     | 33,72       | 2,58              | 2,21           | 0,22                              | 0,257                            | 14,4   |
| 8     | 34,65       | 2,71              | 2,39           | 0,230                             | 0,334                            | 31,14  |
| 9     | 37,39       | 3,15              | 2,91           | 0,388                             | 0,519                            | 25,24  |
| 10    | 32,26       | 2,29              | 2,15           | 0,223                             | 0,303                            | 26,40  |
| 11    | 34,18       | 3,00              | 2,85           | 0,328                             | 0,396                            | 17,17  |
| 12    | 32,20       | 2,82              | 2,67           | 0,193                             | 0,333                            | 42,04  |
| 13    | 33,37       | 2,91              | 2,36           | 0,235                             | 0,288                            | 18,40  |
| 14    | 39,29       | 3,70              | 3,35           | 0,444                             | 0,530                            | 16,23  |
| 15    | 33,02       | 2,58              | 2,39           | 0,171                             | 0,263                            | 34,98  |
| 16    | 36,63       | 3,32              | 3,10           | 0,417                             | 0,563                            | 27,23  |

Примечание.  $K_{IC}''$  – коэффициент интенсивности напряжений, рассчитанный по формуле (3);  $K_{IC}'$  – коэффициент интенсивности напряжений, рассчитанный по формуле (4).



Рис.3. Зависимости коэффициента интенсивности напряжений от прочности на осевое растяжение

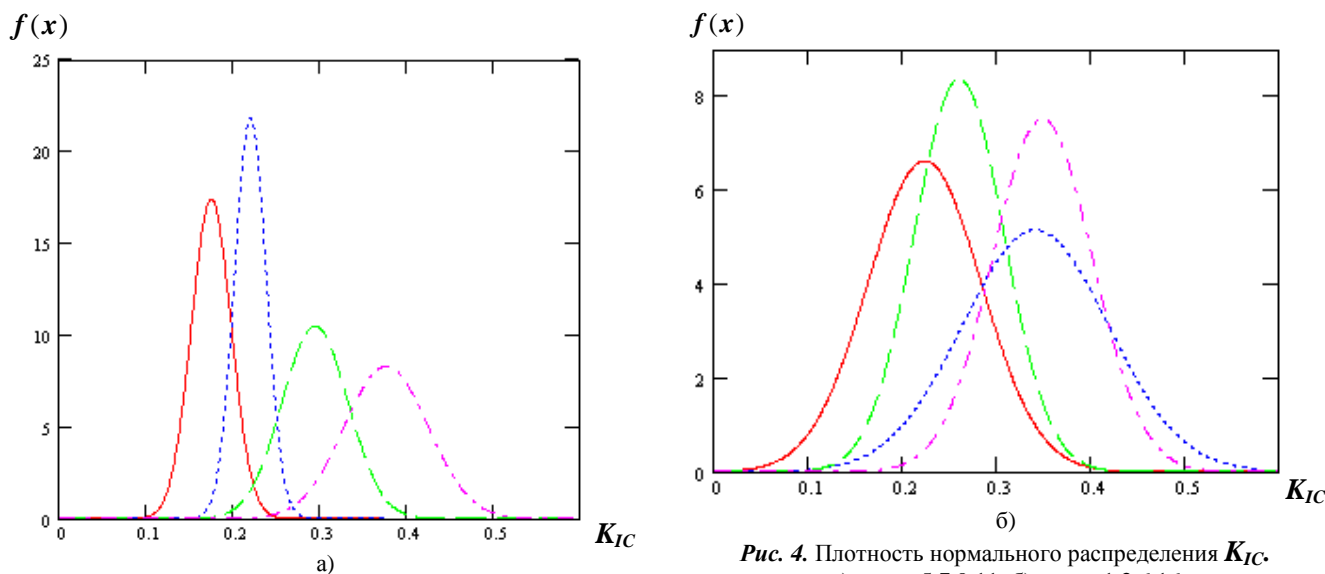


Рис. 4. Плотность нормального распределения  $K_{IC}$ . а) серии 5,7,9,11; б) серии 1,2,6,16

$f_{ct} > 2,5$ , так как стандартное отклонение у этих образцов минимально и при высоких значениях  $K_{IC}$  в бетонах имеет место большая изменчивость этой характеристики.

Одновременное увеличение В/Ц и уменьшение объемной концентрации заполнителя приводит к уменьшению характеристик трещиностойкости образцов. Также уменьшение характеристик трещиностойкости образцов наблюдалось при использовании в качестве вяжущего НЦ-1 и значении объемной концентрации заполнителя 0,5.

### Проверка однородности дисперсий

Однородность дисперсий означает, что среди всех дисперсий  $S_i^2$  нет таких, которые бы значительно превышали все остальные. Для проверки однородности дисперсий во всех точках спектра плана воспользуемся критерием Фишера F. Он определяется из соотношения

$$F = S_{\max}^2 / S_{\min}^2, \quad (6)$$

где  $S_{\max}$ ,  $S_{\min}$  - соответственно максимальное и минимальное значение дисперсии воспроизводимости опытов.

Определение дисперсии воспроизводимости опытов производилось по формуле (7)

$$S_y^2 = \frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{N_i}, \quad (7)$$

где  $Y_i$  - значение функции отклика в  $i$ -той точке спектра плана,  $\bar{Y}$  - выборочное среднее,  $N_i$  - количество опытов в  $i$ -той серии.

Определим дисперсию воспроизводимости эксперимента

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N}. \quad (8)$$

Критерий Фишера оказался равен  $F = 15.66$ . Дисперсии однородны, так как  $F < F_T = 19.164$ , где  $F_T$  - табличное значение критерия Фишера, определяемое при числах степеней свободы  $k_1$  и  $k_2$  и принятом уровне значимости  $\alpha = 0.05$ .

### Проверка значимости коэффициентов

Затем рассчитываем коэффициенты регрессионной модели (6).

$$B = (X^T X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y. \quad (9)$$

При выбранном уровне значимости  $\alpha = 0.05$  и дисперсии воспроизводимости эксперимента  $S_y^2 = 0.012$ , основанной на 41 степени свободы, по критерию Стьюдента ( $t_{0.05,41} = 1.683$ ) устанавливаем статистически значимые коэффициенты. Оказалось, что из шести коэффициентов уравнения (6) статистически значимыми признаны все шесть.

### Проверка адекватности модели

Для проверки адекватности модели нормализуем переменные.

Примем НЦ-4=1, НЦ-1=-1;  $d_{\max} < 20\text{мм} = 1$ ,  $d_{\max} < 10\text{мм} = -1$ ;  $V_{0.7} = 1$ ,  $V_{0.5} = -1$ ; В/Ц<sub>0.4</sub>=1 В/Ц<sub>0.35</sub>=1;  $T_{1.4:1} = 1$ ,  $T_{1:1} = -1$ . 1 (верхний), 2 (нижний) - значения уровней.

Определим остаточную дисперсию

$$s_{ocm}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{N - p} = 0,00823. \quad (10)$$

Определим F-критерий.

$$F = \frac{s_{ocm}^2}{S_y^2} = 0,688. \quad (11)$$

Вычисленный F-критерий, не превышает табличный  $F_{0.05,10,41} = 2,071$ .

Данные, полученные по модели, адекватны полученным экспериментально значениям.

Окончательно были получены следующие полиномиальные модели для исследуемых характеристик:

$$K_{IC}'' = 0,282 - 0,01N - 0,02d_{\max} + 0,024V - 0,042B / Ц - 0,02T; \quad (12)$$

$$f_c = 34,63 + 0,23N - 0,24d_{\max} - 1,26V + 0,02B / Ц - 1,29T; \quad (13)$$

$$f_{ct} = 1,54 - 0,02N + 0,012d_{\max} - 0,09V - 0,039B / Ц - 0,122T. \quad (14)$$

Уравнение (12) получено для коэффициента интенсивности напряжений, подсчитанного по формуле (3). Уравнение (13,14) представляет собой зависимость прочности на сжатие и прочности на растяжения от варьируемых факторов планового эксперимента.

### ВЫВОДЫ

1. По результатам факторного эксперимента установлено, что наибольшее влияние на КИН оказывает объемная концентрация заполнителя, а водоцементное отношение незначительно уменьшает его значение. Соотношение Ц:П и крупность заполнителя также уменьшает КИН.
2. КИН, рассчитанный по формулам теории упругости, имеет определенный запас, составляющий 20-40% по сравнению с методом податливости, что позволяет использовать его для расчета бетонных и железобетонных конструкций.
3. Для определения характеристик трещиностойкости при прочности на растяжение менее 2,5 МПа требуется меньшее количество образцов, чем при  $f_{ct} > 2,5$ , так как стандартное отклонение у этих образцов минимально.
4. Одновременное увеличение В/Ц и уменьшение объемной концентрации заполнителя приводит к уменьшению прочности образцов. Также уменьшение прочности образцов наблюдалось при использовании в качестве вяжущего НЦ-1 и значении объемной концентрации заполнителя 0,5.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Драган В.И., Загуляев С.В.. Методика исследования механических свойств материалов с использованием разрывной машины ИР 5145-500-10.// Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. - 2002. №1(13). - С. 25-29.
2. ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. - М.: Издательство стандартов, 1992. - 18с.
3. Гузев Е.А., Сейланов Л.А., Шевченко В. И. Анализ разрушения бетона по полностью равновесным диаграммам деформирования.//Бетон и железобетон, - 1985. №10. - С.10-12.
4. Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах.: Пер.с англ./Под ред. Ю.Мураками. - М.: Мир, 1990. - 1016 с., ил.

5. Тур В.В., Рак Н.А. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций: Монография. – г. Брест; издательство БГТУ, 2003. – 252 с.
6. Никитин В.И. Моделирование и вычислительный эксперимент в строительно-технологических задачах: Учебное пособие. – Брест: БГТУ, 2001. – 167 с.
7. Никитин В.И., Болтрык М., Бацкель-Бжозовска Б. Влияние режимов обжига, содержания добавки песка и его грансостава на физико-механические свойства стеновой керамики//Вестник БГТУ. Строительство и архитектура.– 2003. №1.–с.56-61.
8. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с., ил.
9. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем: Учебник для вузов. – Мн.:ДизайнПРО, 1997. – 640с.: ил.

УДК 624.05

**Найчук А.Я., Драган В.И., Петрукович А.Н.**

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ДРЕВЕСИНЫ НА ДКБ-ОБРАЗЦАХ

С учётом того, что значительное число деревянных конструкций зданий и сооружений, эксплуатируемых на сегодняшний день, имеют те или иные дефекты и повреждения, наличие которых в ряде случаев ставит под угрозу саму возможность дальнейшей безопасной эксплуатации подобных конструкций, остро встаёт вопрос оценки их несущей способности. Действительную несущую способность деревянных строительных конструкций с повреждениями и (или) дефектами можно определить с использованием механики разрушения на основании определения характеристик трещиностойкости материала (вязкости разрушения), которые характеризуют способность материала сопротивляться возникновению и распространению трещин. Одним из способов определения характеристик трещиностойкости являются экспериментальные исследования. Данная статья посвящена вопросу экспериментального определения вязкости разрушения  $K_{IC}$  для трещин нормального отрыва (разрушение тип I). [1]

В настоящее время разработано множество методов по определению вязкости разрушения изотропных материалов [2]. На основании значительного числа экспериментальных исследований и численного моделирования составлены таблицы значений коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) для различных видов разрушения с учетом возможных вариаций параметров дефектов [3, 4]. Применение таких методов к изучению свойств анизотропных материалов требует ряда дополнительных уточнений и проверки.

При кратковременном действии статической нагрузки одним из эффективных методов определения вязкости разрушения древесины является метод калибровки податливости [5]. Данный метод основан на определении величины высвобождения упругой энергии на единицу приращения площади поверхности трещины  $A$  при её продвижении. В основу этого метода положена модель Гриффитса [2]. Правомерность применения этой модели подтверждается упругой работой древесины при растяжении поперёк и скалывании вдоль волокон вплоть до разрушения [6].

Согласно этому методу, скорость (интенсивность) высвобождения упругой энергии определяется уравнением

$$G = \frac{F_{max}^2}{2} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial A}, \quad (1)$$

где  $F_{max}$  – нагрузка, соответствующая началу роста трещины;  $\lambda$  – податливость образца;  $\frac{\partial \lambda}{\partial A}$  – скорость изменения податливости по отношению к изменению площади поверхно-

сти трещины.

Зависимость между интенсивностью высвобождения упругой энергии и коэффициентами интенсивности напряжений определяется уравнением [2]

$$G_i = c_i \cdot K_i^2, \quad (2)$$

где  $c_i$  – коэффициенты, зависящие от упругих характеристик материала.

В случае нормального отрыва (разрушение тип I – растяжение поперёк волокон древесины) согласно зависимостей [2, 7]

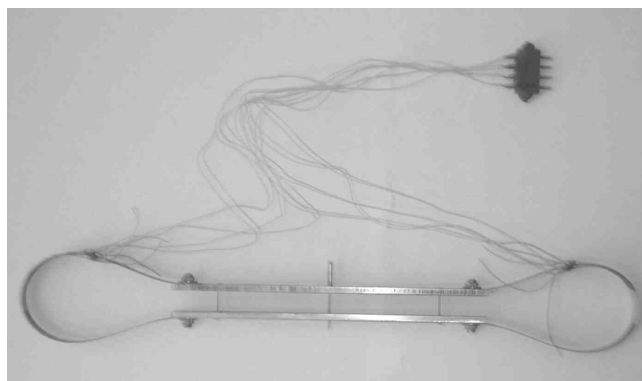
$$c1 = \left( \frac{a_{11} \cdot a_{22}}{2} \right)^{1/2} \cdot \left[ \left( \frac{a_{22}}{a_{11}} \right)^{1/2} + \frac{2 \cdot a_{12} + a_{66}}{2 \cdot a_{11}} \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где  $a_{11} = \frac{1}{E_x}$ ;  $a_{22} = \frac{1}{E_y}$ ;  $a_{12} = -\frac{\nu_{xy}}{E_y} = -\frac{\nu_{yx}}{E_x}$ ;

$a_{66} = \frac{1}{G_{xy}}$ ;  $E_x, E_y, E_z$  – модули упругости;  $G_{xy}$  – модуль

сдвига;  $\nu_{yx}, \nu_{xy}$  – коэффициенты поперечной деформации.

Основными допущениями данного метода являются: трещина имеет прямой фронт в вершине, нормальный к поверхности образца; трещина распространяется вдоль своего первоначального направления; упругие характеристики материала постоянны по всему объёму и не изменяются на протяжении всего испытания.



**Рис. 1.** Упругая скоба с датчиками электрического сопротивления для определения смещений берегов трещины.

**Найчук Анатолий Яковлевич**, к.т.н., директор Республиканского унитарного научно-исследовательского и опытно - конструкторского предприятия "Научно – технический центр".

Беларусь, РУНИиОКП, г. Брест, ул. Московская, 267/2.

**Петрукович Андрей Николаевич**, аспирант каф. строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.