

УДК 624.012.35(043.3)

## МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ БАЛОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ С ПРОДОЛЬНОМ И ПОПЕРЕЧНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

П. В. Кривицкий<sup>1</sup>, А. А. Невдах<sup>2</sup>, И. В. Ткачук<sup>3</sup>, Е. В. Шелест<sup>4</sup>

<sup>1</sup> К. т. н., доцент, заведующий отраслевой лабораторией «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве», УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: krivitskiyp@mail.ru

<sup>2</sup> Магистр технических наук, младший научный сотрудник отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве», УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: alina.nevdah@mail.ru

<sup>3</sup> Инженер отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве», УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: vany\_tkachuk@mail.ru

<sup>4</sup> Магистр технических наук, младший научный сотрудник отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве», УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: shelest.elena@list.ru

### Реферат

В мировой практике все чаще при строительстве зданий и сооружений гражданского назначения, а также транспортной инфраструктуры применяются конструкционные легкие бетоны, в частности керамзитобетон. Несмотря на то, что легкие бетоны обладают сочетанием высоких физико-механических и эксплуатационных показателей, не прекращаются исследования по определению отличительных особенностей в сопротивлении воздействиям элементов из конструкционных легких бетонов и бетонов нормального веса.

В статье рассматриваются вопросы сопротивления срезу железобетонных балочных элементов из легких конструкционных бетонов. Выполнен анализ существующих моделей сопротивления срезу, используемых в отечественной и зарубежной нормативной литературе. Сформирована база данных результатов экспериментальных исследований железобетонных балок из легких бетонов при различных параметрах вариации механических характеристик материалов и конструктивных параметров образцов.

**Ключевые слова:** легкие конструкционные бетоны, бетон нормального веса, сопротивление срезу, база экспериментальных данных, керамзитобетон, прочность бетона на сжатие.

## LIGHTWEIGHT CONCRETE BEAM ELEMENTS SHEAR RESISTANCE MODELS WITH LONGITUDINAL AND TRANSVERSE REINFORCEMENT

P. V. Krivitskiy, A. A. Nevдах, I. V. Tkachuk, H. V. Shelest

### Abstract

In world practice, structural lightweight concretes, in particular, expanded clay concrete, are increasingly used in the construction of civil buildings and structures and also transport infrastructure. Despite the fact that lightweight concretes have a combination of high physical, mechanical and operational parameters, studies on the determination of different features in the resistance to the effects of elements from structural light concretes and concretes of normal weight do not stop.

The article discusses the issues of shear resistance of reinforced concrete beam elements made of lightweight structural concretes. Analysis of existing shear resistance models used in domestic and foreign regulatory literature was performed. Database results of experimental studies of reinforced concrete beams made of lightweight concretes with different parameters of variation of mechanical characteristics of materials and structural parameters of samples has been formed.

**Keywords:** lightweight structural concretes, normal weight concrete, shear resistance, experimental database, expanded clay concrete, compressive strength of concrete.

### Введение

Легкие конструкционные бетоны представляют собой перспективные строительные материалы, которые обладают рядом преимуществ перед бетонами нормального веса (тяжелыми бетонами). Из основных можно выделить: уменьшенный собственный вес получаемых конструкций, более высокая призмная (характеристическая) прочность на сжатие, улучшенные физические (теплоизоляционные, звукоизоляционные) свойства, улучшенное сцепление с арматурой, более высокая устойчивость к образованию микротрещин и превосходящие показатели предельной растяжимости и сжимаемости. В Республике Беларусь популярным заполнителем для легкого бетона служит керамзит. Он является хорошим конструкционным материалом, обладает большой прочностью на сжатие и большим количеством замкнутых пор.

Исследование внедрения легких бетонов, в частности керамзитобетона, производимого в Республике Беларусь, заслуживает особого внимания по ряду ключевых причин. Во-первых, уникальное сочетание геологических условий и доступность качественного керамзита в нашем регионе создают идеальные предпосылки для производства высокопрочного и экологически чистого легкого бетона. Во-вторых, применение передовых технологий производства на местных предприятиях позволяет добиться оптимальных характеристик бетона, таких как высокая прочность на сжатие и улучшенные физические свойства, что делает его более эффективным и долго-

вечным материалом для строительства в условиях переменного климата Республики Беларусь.

В современных зарубежных и отечественных нормах влияние на сопротивление срезу балочных конструкций из легких бетонов учтено только лишь понижающими коэффициентами и существенными ограничениями прочности бетона на сжатие (растяжение). При этом особенности структуры легких бетонов могут не только сказаться на предельном перерезывающем усилии, но также существенно повлиять на характер трещинообразования и разрушения железобетонной конструкции.

### Модели сопротивления срезу

На сопротивление срезу железобетонных балок влияют различные конструктивные параметры: геометрические характеристики сечения (рабочая высота сечения, пролет среза, коэффициент продольного армирования, наличие и количество поперечного армирования, предварительное обжатие бетона), тип нагрузки (сосредоточенная, равномерно распределенная) и характеристики материалов (прочностные и деформационные характеристики бетона, вид заполнителя). Существующие в научной практике модели по-разному учитывают влияние данных параметров, поэтому в большинстве современных строительных норм используются различные допущения, предпосылки, подходы и расчетные уравнения для определения сопротивления срезу.

За последние несколько десятилетий было выполнено большое количество как аналитических, так и экспериментальных исследований в области работы железобетонных конструкций при срезе. Однако среди них не так много исследований, посвященных сопротивлению срезу железобетонных балок из легких бетонов. Ранние экспериментальные исследования показали, что, несмотря на многие преимущества конструкций из легких бетонов, их сопротивление срезу, как правило, ниже, чем конструкций из бетонов нормального веса, при прочих равных условиях. Как результат, для учета различий в физико-механических характеристиках легких бетонов в сравнении с бетонами нормального веса в нормативно-технической литературе предлагают вводить понижающие коэффициенты и ограничения при расчете конструкций.

Большинство понижающих коэффициентов связано с учетом изменения (уменьшения) плотности легкого бетона и, в меньшей степени, с составом бетона. Данные ограничения могут существенно занижать реальные прочностные характеристики легкого бетона и требуют дополнительного анализа. Появление новых легких заполнителей, а также постоянные улучшения физико-механических характеристик известных заполнителей для легких бетонов и расширение сферы применения данных заполнителей в строительстве увеличивают необходимость в дополнительном изучении сопротивления срезу конструкций, изготовленных из легких бетонов. За счет оптимизации состава, введения новых добавок и модификаторов, а также благодаря улучшению технологий производства и обработки материалов можно значительно улучшить физико-механические свойства легких бетонов.

В работе выполнен обзор «механических» и «эмпирических» подходов и моделей к определению и анализу сопротивления срезу железобетонных балочных конструкций. Механические модели традиционно базируются на аналитических зависимостях и положениях, позволяющие учитывать в полной мере механические свойства материалов. С другой стороны, эмпирические модели разрабатываются на основе анализа экспериментальных данных и часто применя-

ются для оценки конкретных расчетных ситуаций, таких как работа бетона при срезе. В отличие от механических, эмпирические модели могут напрямую учитывать особенности сопротивления конструкций из легких бетонов, включая эффекты, связанные с типом и свойствами заполнителей, в частности керамзитобетона.

Понимание механизмов передачи среза между материалами в железобетонных конструкциях является ключом к получению оптимальной модели сопротивления срезу балочных элементов из легких бетонов. Различные подходы, используемые в механических и эмпирических моделях, указывают на множество факторов, влияющих на сопротивление конструкций. В большинстве своем модели сопротивления срезу включают в себя следующий минимум составляющих: усилие в сжатом бетоне над наклонной трещиной, усилие в продольной арматуре (нагельный эффект), силы зацепления по берегам трещины, усилие в поперечной арматуре (при ее наличии) – взаимосвязь между которыми до конца не изучена.

Анализ экспериментальных данных показывает, что вид бетона значительно влияет на характер трещинообразования и разрушения железобетонных балок. В балках из легких бетонов существует тенденция развития трещин с шероховатыми краями, проходящих через цементный камень (матрицу) и заполнитель. Также такие балки без поперечного армирования склонны к хрупкому разрушению по сжатой бетонной полосе. Использование поперечного армирования значительно повышает сопротивление срезу железобетонных балок, однако данное утверждение требует дополнительного детального изучения путем выполнения натуральных экспериментальных исследований.

Представленный обзор моделей сопротивления срезу железобетонных балок охватывает широкий спектр подходов и методик, разработанных на основе, как теоретических исследований, так и экспериментальных данных. В таблице 1 представлены модели, описанные в отечественных и зарубежных строительных нормах и стандартах, учитывающие особенности напряженно-деформированного состояния легких бетонов при действии нагрузки.

Таблица 1 – Расчетные модели для определения сопротивления сечений срезу железобетонных элементов

| Источник   | Условие сопротивления сечения   | Примечание   |
|--|---|--|
| СП 5.03.01-2020 [1],<br>ТКП EN 1992-1-1-2009 [2] | $V_{Ed} \leq V_{Rd,sy}, V_{Ed} \leq V_{Rd,max};$ $V_{Rd,max,comp} = \alpha_c V_{Rd,max};$ $V_{Rd,max} = b_w z v_1 f_{lck} / (\cot \theta + \tan \theta);$ $V_{Rd,sy} = A_{sw} / s \cdot z f_{ywd} \cot \theta \text{ при}$ $\begin{cases} A_{sw,max} f_{ywd} / (b_w s) \leq 0,5 v_1 f_{lck} \text{ по [1]} \\ A_{sw,max} f_{ywd} / (b_w s) \leq 0,5 \alpha_c v_1 f_{lck} \text{ по [2]}. \end{cases}$ | $v_1 = 0,5 \eta_1 (1 - f_{lck} / 250);$ $\eta_1 = 0,40 + 0,60 \rho_{LC} / 2200 \text{ по [1],}$ $\eta_1 = 1 \text{ по [2]}$ $f_{lck} = k_{lrc} f_{lck} / \gamma_c; f_{ywd} = 0,8 f_{yk};$ $z = 0,9d.$  |
| СНиП 2.03.01-84 [3],<br>СП 63.13330.2018 [4]     | $Q \leq 0,3 \varphi_{w1} \varphi_{b1} R_b b h_0,$ $Q \leq Q_b + Q_{sw};$ $Q_b = (\varphi_{b2} (1 + \varphi_f + \varphi_n) R_{bt} b h_0^2) / c \geq$ $\geq \varphi_{b3} (1 + \varphi_f + \varphi_n) R_{bt} b h_0;$ $Q_b \leq 2,5 R_{bt} b h_0 \text{ по [4];}$ $Q_{sw} = \varphi_{sw} q_{sw} c_0.$   | $\varphi_{b1} = 1 - \beta R_b \text{ по [3], } \varphi_{b1} = 1 \text{ по [4];}$ $\varphi_f = 0,75 (b'_f - b) h'_f / (b h_0) \leq 0,5;$ $b'_f \leq b + 3 h'_f; \varphi_n = 0,1 \frac{N}{R_{bt} b h_0} \leq 0,5;$ $1 + \varphi_f + \varphi_n \begin{cases} = 1 \text{ по [3]} \\ \leq 1,5 \text{ по [4]} \end{cases};$ $\varphi_{w1} = 1 + 5 \alpha \mu_w \leq 1,3 \text{ по [3],}$ $\varphi_{w1} = 1 \text{ по [4];}$ $q_{sw} = R_{sw} A_{sw} / s \geq [\varphi_{b3} (1 + \varphi_n + \varphi_f) R_{bt} b] / 2.$ |
| Model Code 2010, fib<br>Bulletin 56 [5]          | $V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} \geq V_{Ed};$   | $z = 0,9d; \rho_w \geq 0,08 \sqrt{f_{lck}} / f_{yk};$  |

Продолжение таблицы 1

|                           |   |   |
|---------------------------|---|---|
|                           | $V_{Rd,max} = k_c f_{lck} / \gamma_c \cdot b_w z \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta};$ $V_{Rd,c} = k_v \sqrt{f_{lck}} / \gamma_c \cdot z b_w;$ $V_{Rd,s} = A_{sw} / s_w \cdot z f_{ywd} (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha;$ <p>III Уровень аппроксимации</p> $\theta = 29^\circ + 7000 \varepsilon_x;$ $k_c = 0,55 (30 / f_{lck})^{1/3} \leq 0,55;$ $k_v = 0,4 / (1 + 1500 \varepsilon_x) \times$ $\times 1300 / (1000 + 0,7 k_{dg} z) \text{ при } \rho_w = 0;$ $k_v = 0,4 / (1 + 1500 \varepsilon_x) \text{ при}$ $\rho_w \geq 0,08 \sqrt{f_{lck}} / f_{yk};$ $k_{dg} = 48 / (16 + d_g) \geq 1,15.$         | $\varepsilon_x = \frac{M_{Ed} / z + V_{Ed} + 0,5 N_{Ed} - A_p f_{p0}}{2(E_s A_s + E_p A_p)};$ $\Delta F_{td} = V_{Ed} / 2(\cot \theta - \cot \alpha) +$ $+ V_{Rd,c} / 2(\cot \theta + \cot \alpha).$  |
| <p>ACI 318-19 [6]</p>     | $V_n = V_c + V_s;$ $V_u \leq \phi(V_c + 0,66 \sqrt{f'_c} b_w d);$ <p>при <math>A_v \geq A_{v,min}</math> любое из</p> $V_c = [0,17 \lambda \sqrt{f'_c} + N_u / (6A_g)] b_w d,$ $V_c = [0,66 \lambda (\rho_w)^{1/3} \sqrt{f'_c} + N_u / (6A_g)] b_w d;$ <p>при <math>A_v &lt; A_{v,min}</math></p> $V_c = [0,66 \lambda_s \lambda (\rho_w)^{1/3} \sqrt{f'_c} + N_u / (6A_g)] b_w d;$ $V_c < 0,42 \lambda \sqrt{f'_c} b_w d;$ <p>при <math>V_u &gt; \phi V_c, V_s \geq V_u / \phi - V_c;</math></p> $V_s = A_v f_{yr} d / s,$ $V_s = A_v f_{yr} (\sin \alpha + \cos \alpha) d / s - \text{при}$ <p>наклонной поперечной арматуре.</p> | $\frac{N_u}{6A_g} < 0,05 f'_c;$ $\lambda_s = \sqrt{\frac{2}{1 + 0,004d}} \leq 1;$ $\frac{V_u d_p}{M_u} = \frac{d_p (l - 2x)}{x(l - x)} \text{ при } d_p \geq 0,8h;$ $\frac{A_v}{s} = \frac{(V_u - \phi V_c)}{\phi f_{yr} d}.$   |
| <p>BS 8110-1:1997 [7]</p> | $v = V / (b_v d) \leq v_{Rd} = v'_c + v_s;$ $v'_c = v_c + 0,6 N V h / (A_c M);$ $v_s = 0,4 \text{ при } 0,5 v_c < v < (v_c + 0,4),$ $v_s = v - v_c = 0,95 f_y A_{sw} / (b_w s) \text{ при}$ $(v_c + 0,4) < v < 5 \text{ и } v < 0,8 \sqrt{f_{cu}}.$   | $100 \cdot A_s / (b_v d); N h / M \leq 1,0;$ $\sum A_{sv} = a_v b_v (v - 2 d v_c / a_v) / 0,95 f_{yv} \geq$ $\geq 0,4 b_v a_v / 0,95 f_{yv}.$   |
| <p>CSA A23.3-04 [8]</p>   | $V_{sd} \leq V_r = V_c + V_s + V_p \leq$ $\leq V_{r,max} = 0,25 \phi_c f'_c b_w d_v + V_p;$ $V_c = \phi_c \lambda \beta \sqrt{f'_c} b_w d_v;$ $V_s = \phi_s A_v f_y d_v (\cot \theta + \cot \alpha) \sin \alpha / s.$   | $\phi_c = 0,65, \phi_s = 0,85;$ $\theta = 29^\circ + 7000 \cdot \varepsilon_x \leq 75^\circ;$ $\beta = \frac{0,4}{1 + 1500 \cdot \varepsilon_x} \cdot \frac{1300}{1000 + s_{ze}};$ $\varepsilon_x = \frac{M_f / d_v + V_f - V_p + 0,5 N_f - A_p f_{p0}}{2(E_s A_s + E_p A_p)}.$ |

Продолжение таблицы 1

|   |   |   |
|---|---|---|
| <p>JSCE №15 [9]</p>                           | $V_{Sd} \leq V_{yd} = V_{cd} + V_s + V_{ped} \leq$ $\leq V_{cwd} = f_{cwd} \cdot b_w \cdot d;$ $V_{sd} = [A_{sw} \cdot f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / S_s] +$ $+ A_{pw} \sigma_{pw} (\sin \alpha_p + \cos \alpha_p) / s_p \cdot z / \gamma_b.$ | $f_{vcd} = 0,20 \cdot \sqrt[3]{f'_{cd}} \leq 0,72;$ $\rho_w = A_s / (b_w \cdot d);$ $\beta_d = \sqrt[4]{1000 / d} \leq 1,5; \beta_p = \sqrt[3]{100 \rho_w} \leq 1,5;$ $\beta_n = 1 + 2M_0 / M_{ud} \leq 2;$ $z = d / 1,15.$ |
| <p>NZC 3101-1 [10]</p>                        | $V_{Sd} \leq V_n = V_c + V_s;$ $V_c = v_c A_{cv};$ $v_c = k_d k_a v_b;$ $V_s = f_{yt} A_v / s \cdot d (\sin \alpha + \cos \alpha).$   | $v_b = \min \left\{ \begin{array}{l} (0,07 + 10 \rho_w) \sqrt{f'_c} \\ 0,2 \sqrt{f'_c} \end{array} \right., \text{ но не менее,}$ <p>чем <math>0,08 \sqrt{f'_c}</math>.</p>   |
| <p>K.-K. Choi, J.-C. Kim, H.-G. Park [11]</p> | $V_{Sd} \leq V_n = V_{ct} + V_{cc} + V_a + V_s;$ $V_{ct} = k_s f_t b (c - c_c) \cot \theta_c;$ $V_{cc} = \sqrt{f'_c (f'_c - \sigma_{cc})} b c_c;$ $V_a = (f_t / 2) b l_{cr} \cos \theta_t;$ $V_s = \rho_v f_{yt} b (d - c) \tan \theta_t.$                | $f_t = 0,21 \sqrt{f'_c};$ $k_s = 1,2 - 0,2a \geq 0,65;$ $c_c = c - (a - x_1 - d + c);$ $\rho_v = A_{sv} / (bs).$  |

В действующих отечественных нормах [1, 2] оценку сопротивления срезу железобетонных элементов из легких бетонов предлагается выполнять посредством не только замены соответствующего показателя прочности бетона на сжатие, а применение понижающего коэффициента  $V_1$  (коэффициента разупрочнения), учитывающего особенности напряженно-деформированного состояния бетона на участках между наклонными трещинами. При определении коэффициента  $V_1$  используются параметры, характеризующие физико-механические характеристики легких бетонов:

$\rho_{LC}$  – верхнее значение плотности для класса легкого бетона по плотности, кг/м<sup>3</sup>;

$f_{lck}$  – характеристическая прочность на осевое сжатие легкого бетона.

Так же при определении расчетной прочности на сжатие легких бетонов применяется коэффициент  $k_{lrc}$ , учитывающий влияние на прочность на сжатие легкого бетона длительности действия нагрузки, неблагоприятного способа ее приложения и т. п. Значение  $k_{lrc}$  рекомендуется определять

$$k_{lrc} = \begin{cases} \left( \frac{\rho_{LC}}{2200} \right)^{0,25} no [1] \\ 0,85 no [2] \end{cases} \quad (1)$$

В нормативных документах [3, 4] учет особенностей сопротивления срезу железобетонных балочных элементов из легких бетонов предлагается выполнять с применением сразу несколько коэффициентов:

$\beta$  – коэффициент, принимаемый для легкого бетона 0,02;

$\Phi_{b_2}$  – коэффициент, учитывающий влияние бетона, принимается равным:

– по [4]: 1,5;

– по [3] для легкого бетона при марке по средней плотности:

D1900 и более – 1,90;

D1800 и менее при плотном мелком заполнителе – 1,75;

$\Phi_{b_3}$  – коэффициент, принимается равным:

– по [4]: 0,5;

– по [3] для легкого бетона при марке средней плотности:

D1900 и более – 0,5;

D1800 и менее – 0,4.

В *Model Code 2010 fib Bulletin 56* [5] при определении сопротивления срезу конструкций из легких бетонов предлагается заменять в аналитических зависимостях, применимых для элементов из бетона нормального веса, только характеристическое значение прочности бетона на сжатие на значение  $f_{lck}$ , указанное в *Model Code 2010 fib Bulletin 55* [12].

В *ACI 318-19* [6] представлен коэффициент модификации  $\lambda$ , отражающий пониженные механические характеристики легкого бетона по сравнению с бетонами нормального веса (тяжелыми бетонами) с той же прочностью на сжатие. Данный коэффициент определяется на основе плотности бетонной смеси (таблица 19.2.4.1 (а) [6]) или на основе состава заполнителей бетонной смеси (таблица 19.2.4.1(b) [6]). Допускается принимать  $\lambda$  равным 0,75 для легких бетонов.

Британские нормы [7] предусматривают ограничение для расчетного напряжения среза бетона  $V_c$ . Для принятых в [7] марок бетона 25 и более данное значение следует принимать с понижающим коэффициентом 0,8 к значениям, приведенных в таблице 3.8 стандарта *BS 8110-1:1997* [7]. Для бетона марки 20 следует использовать значения, приведенные в таблице 5.3 *BS 8110-2:1985* [13]. Напряжение среза  $V$  не должно превышать меньшее значение  $0,63 \sqrt{f_{cu}}$  или 4 МПа.

В *CSA A23.3-04* [8] оценку изгибаемых железобетонных элементов из легких бетонов предлагается выполнять с применением коэффициента модификации плотности бетона  $\lambda$ . Данный коэффициент принимается от 0,75 до 0,85 для легких бетонов и может интерполироваться в пределах указанных значений.

В JSCE №15 [9] указано ограничение прочности бетона на сжатие для железобетонных элементов из легких бетонов: если фактические данные по прочности отсутствуют, расчетную прочность допускается принимать равной 70 % от расчетной прочности бетона нормального веса соответствующего класса.

Новозеландский стандарт проектирования бетонных конструкций [10] предусматривает корректировку заданной прочности бетона на сжатие  $\sqrt{f'_c}$  для конструкций из легких бетонов: если известно значение средней прочности на растяжение бетона с легким заполнителем  $f_{ct}$  и бетонная смесь выполнена согласно требованиям NZS 3152 [14], то  $\sqrt{f'_c}$  допускается принимать  $1,8f_{ct} \leq \sqrt{f'_c}$ ; если значение  $f_{ct}$  не известно, то принимается значение от  $0,75\sqrt{f'_c}$  до  $0,85\sqrt{f'_c}$  в зависимости от структуры легкого бетона.

К.-К. Choi, J.-С. Kim, H.-G. Park [11] была предложена унифицированная модель для железобетонных балочных элементов независимости от вида бетона, учитывающая сразу несколько составляющих, участвующих в сопротивлении срезу. Несмотря на универсальность данной модели, требуется ее корректировка и дополнение для учета особенностей сложного напряженно-деформированного состояния элементов из легких бетонов на участках возможного разрушения из-за среза. На рисунке 1 представлена схема распределения внутренних усилий данной модели.

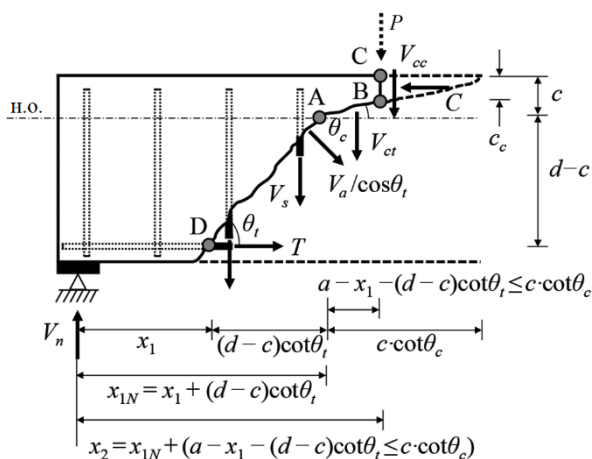


Рисунок 1 – Схема усилий в наклонном сечении железобетонной балки в модели [11]

Представленный обзор моделей сопротивления срезу [1–11] выступает базой для последующей верификации и определения возможности их применения при оценке сопротивления срезу балочных элементов из легких бетонов. Анализ взаимосвязи и особенностей учета ряда параметров, определяющих различия в составах бетонов, влияющих на сопротивление срезу, указывает на сложность проектирования железобетонных конструкций из легких бетонов и важность исследования данного вопроса.

Таблица 2 – Размеры и характеристики экспериментальных образцов из легкого бетона

| Автор   | Кол-во образцов | b, мм   | h, мм   | d, мм   | a/d     | $\rho_s, \%$ | $\rho_{st}, \%$ | $f'_c, \text{МПа}$ |
|---|-----------------|---------|---------|---------|---------|--------------|-----------------|--------------------|
| M. J. Heiser, A. Hosny, S. H. Rizkalla, P. Zia [15] | 6               | 305     | 457     | 405     | 3       | 1,22         | 0–0,5           | 28,6–46,5          |
| X. M. Аль-Хужейри [16]                              | 24              | 80      | 120     | 100     | 2,5     | 3,21         | 0–0,75          | 13,3–19,3          |
| К.-Н. Yang, J.-I. Sim, B.-J. Choi, E.-T. Lee [17]   | 8               | 200     | 400     | 360     | 2,5     | 4,95         | –               | 31,2–37,4          |
| D. L. Ivey, E. Buth [18]                            | 23              | 108–225 | 229–457 | 188–395 | 2,0–5,0 | 0,95–2,1     | –               | 19,2–29,6          |
| J. A. Hanson [19]                                   | 19              | 152,4   | 304,8   | 266,7   | 3,05    | 2,5–5,0      | –               | 20,6–73,6          |
| T. H.-K. Kang, W. Kim, Y.-K. Kwak, S.-G. Hong [20]  | 9               | 125     | 250     | 210     | 2,0–4,9 | 1,29         | 0–0,75          | 39,6–47,7          |
| Итого   | 89              |         |         |         |         |              |                 |                    |

### База экспериментальных данных

Для верификации рассмотренных выше моделей сформирована база данных результатов испытаний балочных опытных образцов зарубежных и отечественных исследователей. База включает в себя железобетонные балки с различными видами бетонов на легких крупных заполнителях (керамзит, вспученный сланец, вспученный доменный сланец и др.), схемами армирования и типом нагружения. Все опытные образцы, включенные в базу (таблица 2), имеют прямоугольную форму поперечного сечения.

При анализе экспериментальных образцов учитывались основные параметры испытанных балок, влияющие на сопротивление срезу:

- 1) эффективная (рабочая) высота сечения  $d$ , мм;
- 2) пролет среза  $a/d$ ;
- 3) коэффициент продольного армирования  $\rho_s, \%$ ;
- 4) коэффициент поперечного армирования  $\rho_{sw}, \%$ ;
- 5) прочность бетона при сжатии  $f'_c, \text{МПа}$ .

Принимая во внимание, что база была сформирована на основе экспериментальных данных различных авторов, каждая группа образцов имеет свой ряд варьируемых параметров.

Для экспериментальных образцов, представленных в данной базе, использовались следующие схемы нагружения, показанные на рисунке 2.

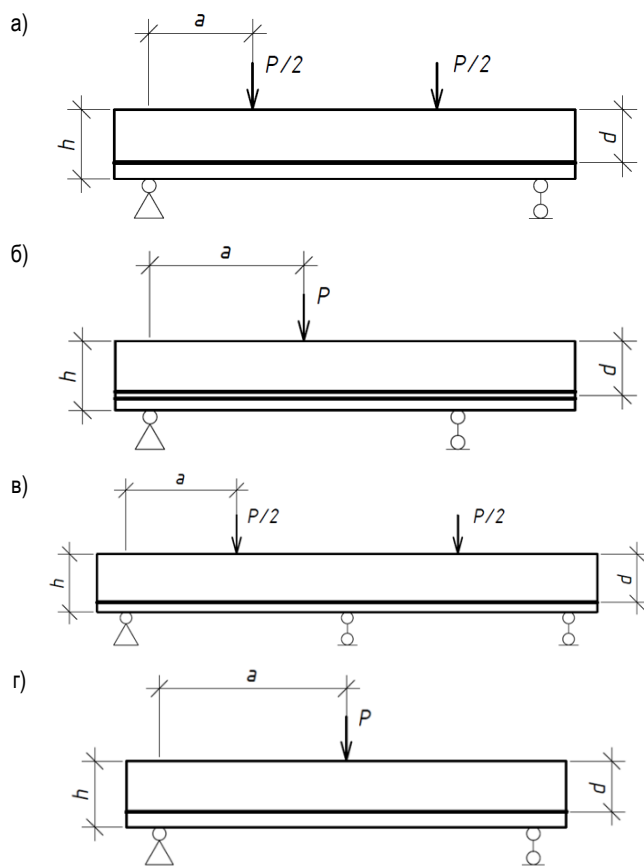


Рисунок 2 – Схемы нагружения образцов

В работе М. J. Heiser [et al.] [15] в качестве опытных образцов применялись балки прямоугольного сечения с геометрическими размерами 305 × 457 мм, выполненные из легкого бетона на вспученном сланце в качестве крупного заполнителя. Оценка трещинообразования и разрушения производилась на шести опытных балках. Схема нагружения экспериментальных образцов, представленная авторами [15], показана на рисунке 2б. Принятая схема нагружения балок соответствовала испытаниям образцов с  $a/d$  равным 3,0. В качестве варьируемого параметра выступал коэффициент продольного армирования  $\rho_s$  (от 0 до 0,5 %).

В работе Х. М. Аль-Хужейри [16] собрана база образцов, в которых рассматривается влияние армирования из базальтовой фибры (волокна) на прочность и трещиностойкость наклонных сечений керамзитожелезобетонных балок при наличии и отсутствии поперечного армирования. В качестве опытных образцов использовались балки прямоугольного поперечного сечения с размерами 80 × 120 мм и длиной 1500 мм. Схема испытания представлена на рисунке 2а. К опытным образцам прикладывалась кратковременная нагрузка двумя симметрично расположенными сосредоточенными силами, приложенными на расстоянии 250 мм от оси опоры ( $a/d$  более 2,0). Каждая балка испытывалась дважды (второй раз после усиления разрушенного участка), что позволяло выполнить 24 экспериментальных исследования.

Авторами К.-Н. Yang, J.-I. Sim, B.-J. Choi, E.-T. Lee [17] было испытано 12 балок, чтобы установить влияние максимального размера крупного заполнителя на поведение железобетонных балок при срезе. В результате испытаний было получено, что сопротивление срезу многопролетных балок из легкого бетона увеличивалось с увеличением максимального размера крупного заполнителя. 12 образцов были разделены на три группы в зависимости от типа бетона: полностью легкий бетон (ALWC), выполненный из крупного и мелкого заполнителя из керамзитового гравия, легкий бетон (SLWC), выполненный только из керамзитового песка, и бетон нормального веса (NWC) на гранитном щебне и кварцевом песке. Образцы имели размер поперечного сечения 200 × 400 мм. Схема нагружения экспериментальных образцов, представленная авторами [17], указана на рисунке 2в. Максимальный размер заполнителя  $d_a$  варьируется от 4 до 19 мм в каждой группе. Отношение рабочей высоты балки к максимальному размеру крупного заполнителя  $d/d_a$  варьируется в пределах от 18,9 до 90.

D. L. Ivey, E. Buth [18] в своей работе рассматривают результаты испытаний 26 балок из конструкционного легкого бетона. В качестве варьируемых параметров были приняты пролет среза  $a/d$  (от 2,0 до 5,0), процент продольного армирования  $\rho_s$  (от 0,95 до 2,10) и тип заполнителя (керамзит, вспученный сланец, вспученный доменный сланец). Двадцать три из двадцати шести испытанных балок имели размеры 152 × 305 мм в поперечном сечении. Схема испытания данных образцов представлена на рисунке 2а. Остальные три балки были выполнены сечением 108 × 229 мм, 191 × 381 мм и 225 × 457 мм и испытывались согласно схеме нагружения, представленной на рисунке 1(г).

Автором J. A. Hanson [19] приведены результаты испытаний 21 железобетонного балочного образца. Все образцы были выполнены сечением с размерами 152,4 × 304,8 мм. Схема нагружения образцов представлена на рисунке 2а. Варьируемыми параметрами являлись коэффициент продольного армирования  $\rho_s$  (от 2,5 до 5,0 %) и использование разных видов крупного и мелкого заполнителей, таких как вспученный сланец, керамзит, вспученный доменный шлак, углеродсодержащий сланец.

В статье Т.-Н.-К. Kang, W. Kim, Y.-К. Kwak, S.-G. Hong [20] приводятся испытания 12 балок двумя сосредоточенными нагрузками, включая девять балок из легкого бетона с поперечным армированием и три балки из тяжелого бетона. Все образцы были одинакового поперечного сечения 125 × 250 мм. Схема испытания балок показана на рисунке 2а. Варьируемыми параметрами являлись коэффициент продольного армирования  $\rho_s$  (от 0 до 0,75 %) и пролет среза  $a/d$  (от 2,0 до 4,9).

## Заключение

Сопротивление срезу железобетонных балок определяется множеством факторов, начиная от геометрических размеров и заканчивая типом нагрузки и свойствами материалов. И, несмотря на то, что железобетонные элементы из легких бетонов обладают множеством преимуществ, они, как правило, показывают меньшее сопротивление срезу по сравнению с конструкциями из тяжелого бетона. Эта особенность требует ввода понижающих коэффициентов [1–10], что не всегда адекватно описывает действительную работу элементов из легких бетонов.

Выполнена оценка существующих моделей сопротивления срезу, представленных в зарубежных и отечественных нормах и стандартах, с учетом особенностей физико-механических характеристик легких бетонов. Для анализа моделей была сформирована база экспериментальных образцов, которые имели различный состав легких бетонов, геометрические характеристики и тип нагружения. Исследование влияния данных параметров, а также дальнейшее изучение характера трещинообразования и разрушения экспериментальных образцов, улучшат понимание сопротивления срезу железобетонных балок из легких бетонов и способствует разработке их методики расчета.

## Список цитированных источников

1. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введ. 20.05.2022. – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2022. – 244 с.
2. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1–1. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1992-1-1-2009. – Введ. 01.09.2019. – Минск : РУП «Стройтехнорм», 2021. – 310 с.
3. Бетонные и железобетонные конструкции : СНиП 2.03.01-84. – Введ. 01.01.1986 (с отменой на территории РБ). – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. – 82 с.
4. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 63.13330.2018. – Введ. 20.06.2019. – М. : АО «НИЦ «Строительство», 2019. – 124 с.
5. Model Code 2010. First complete draft. Volume 2. fib Bulletin No. 56, Lausanne, 2010. – 293 p.
6. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19), Michigan, 2019. – 628 p.
7. Structural use of Concrete – Part 1: Code of practice for design and construction. BS 8110-1:1997, London, 1997. – 160 p.
8. Design of concrete structures. CSA A23.3-04, Canada, 2004. – 232 p.
9. Standard specifications for concrete structures – 2007. “Design”. JSCE Guidelines for concrete No. 15, Japan, 2007. – 502 p.
10. Concrete structures standard – The design of concrete structures. NZC 3101-1, Wellington, 2006. – 309 p.
11. Shear Strength Model of Concrete Beams Based on Compression Zone Failure Mechanism / K.-K. Choi, J.-C. Kim, H.-G. Park. – Michigan : ACI Structural Journal, September 1, 2016. – P. 1095–1119.
12. Model Code 2010. First complete draft. Volume 1. fib Bulletin No. 55, Lausanne, 2010. – 297 p.
13. Structural use of Concrete – Part 2: Code of practice for special circumstances. BS 8110-2:1985, London, 1985. – 68 p.
14. Specification for the manufacture and use of structural and insulating lightweight concrete – Metric Units. NZS 3152:1974, Wellington, 1974. – 23 p.
15. Bond and shear behavior of concrete beams containing lightweight synthetic particles / M. J. Heiser [et al.]. – Michigan : ACI Structural Journal, November 1, 2011. – P. 698–705.
16. Аль-Хужейри, Х. М. Прочность и трещиностойкость наклонных сечений керамзитовофиброжелезобетонных балок и их прогибы с учетом сдвиговых деформаций : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Х. М. Аль-Хужейри ; Ростовский гос. строит. ун-т. – Воронеж, 1997. – 27 с.
17. Effect of aggregate size on shear behavior of lightweight concrete continuous slender beams / K.-H. Yang [et al.]. – Michigan : ACI Structural Journal, September 1, 2011. – P. 501–509.
18. Ivey, D. L. Shear Capacity of Lightweight Concrete Beams / D. L. Ivey, E. Buth. – Michigan : ACI Structural Journal, October, 1967. – P. 634–643.

19. Hanson, J. A. Shear Strength of Lightweight Reinforced Concrete Beams / J. A. Hanson. – Michigan : ACI Structural Journal, March, 1959. – P. 387–404.
20. Shear Testing of Steel Fiber-Reinforced Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcement / T. H.-K. Kang [et al.]. – Michigan : ACI Structural Journal, September 1, 2011. – P. 553–561.
12. Model Code 2010. First complete draft. Volume 1. fib Bulletin No. 55, Lausanne, 2010. – 297 p.
13. Structural use of Concrete – Part 2: Code of practice for special circumstances. BS 8110-2:1985, London, 1985. – 68 p.
14. Specification for the manufacture and use of structural and insulating lightweight concrete – Metric Units. NZS 3152:1974, Wellington, 1974. – 23 p.

#### References

1. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SP 5.03.01-2020. – Vved. 20.05.2022. – Minsk : RUP «Strojtekhnorm», 2022. – 244 s.
2. Evrokod 2. Proektirovanie zhelezobetonnykh konstrukcij. CHast' 1–1. Obshchie pravila i pravila dlya zdaniy : TKP EN 1992-1-1-2009. – Vved. 01.09.2019. – Minsk : RUP «Strojtekhnorm», 2021. – 310 s.
3. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SNiP 2.03.01-84. – Vved. 01.01.1986 (s otmenoi na territorii RB). – M. : NIIZHB Gosstroya SSSR, 1986. – 82 s.
4. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SP 63.13330.2018. – Vved. 20.06.2019. – M. : AO «NIC «Stroitel'stvo», 2019. – 124 s.
5. Model Code 2010. First complete draft. Volume 2. fib Bulletin No. 56, Lausanne, 2010. – 293 p.
6. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19), Michigan, 2019. – 628 p.
7. Structural use of Concrete – Part 1: Code of practice for design and construction. BS 8110-1:1997, London, 1997. – 160 p.
8. Design of concrete structures. CSA A23.3-04, Canada, 2004. – 232 p.
9. Standard specifications for concrete structures – 2007. "Design". JSCE Guidelines for concrete No. 15, Japan, 2007. – 502 p.
10. Concrete structures standard – The design of concrete structures. NZC 3101-1, Wellington, 2006. – 309 p.
11. Shear Strength Model of Concrete Beams Based on Compression Zone Failure Mechanism / K.-K. Choi, J.-C. Kim, H.-G. Park. – Michigan : ACI Structural Journal, September 1, 2016. – P. 1095–1119.
15. Bond and shear behavior of concrete beams containing lightweight synthetic particles / M. J. Heiser [et al.]. – Michigan : ACI Structural Journal, November 1, 2011. – P. 698–705.
16. Al'-Huzhejri, H. M. Prochnost' i treshchinostojkost' naklonnykh sechenij keramzitofibrozhelzobetonnykh balok i ih progiby s uchetom sdvigovykh deformacij : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.01 / H. M. Al'-Huzhejri ; Rostovskij gos. stroit. un-t. – Voronezh, 1997. – 27 s.
17. Effect of aggregate size on shear behavior of lightweight concrete continuous slender beams / K.-H. Yang [et al.]. – Michigan : ACI Structural Journal, September 1, 2011. – P. 501–509.
18. Ivey, D. L. Shear Capacity of Lightweight Concrete Beams / D. L. Ivey, E. Buth. – Michigan : ACI Structural Journal, October, 1967. – P. 634–643.
19. Hanson, J. A. Shear Strength of Lightweight Reinforced Concrete Beams / J. A. Hanson. – Michigan : ACI Structural Journal, March, 1959. – P. 387–404.
20. Shear Testing of Steel Fiber-Reinforced Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcement / T. H.-K. Kang [et al.]. – Michigan : ACI Structural Journal, September 1, 2011. – P. 553–561.

*Материал поступил 17.03.2024, одобрен 19.03.2024, принят к публикации 19.03.2024*