

УДК 624.012.35(043.3)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК ИЗ КЕРАМЗИТОБЕТОНА С ПОПЕРЕЧНЫМ АРМИРОВАНИЕМ

П. В. Кривицкий¹, А. А. Невдах²

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

² Младший научный сотрудник отраслевой лаборатории «Научно-исследовательский центр инноваций в строительстве», Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь, e-mail: alina.nevdah@mail.ru

Реферат

В статье рассматриваются результаты оценки применимости современных методик расчета сопротивления срезу при действии поперечных сил железобетонных балок из конструкционного керамзитобетона с поперечным армированием. Актуальность темы обусловлена широкими перспективами применения лёгких бетонов в несущих конструкциях, сочетая в себе характеристики ограждающих конструкций. При этом тема остается недостаточно изученной: отсутствуют расчётные методики, учитывающие особенности структуры легких бетонов. Структура лёгкого бетона, обусловленная наличием пористого заполнителя, предопределяет особенности его работы при действии поперечных сил.

Выполнен обзор исследований конструкционного керамзитобетона, включая вклад отечественной научной школы в изучение его физико-механических свойств и в развитие методов расчёта железобетонных конструкций, в частности сопротивления срезу. Систематизированы расчётные модели сопротивления срезу, заложенные в отечественных и зарубежных нормативных документах, отмечены способы учета особенностей лёгкого бетона. Сформирована обширная экспериментальная база результатов испытаний балочных образцов из лёгких бетонов, из которой по ряду основных критериев выделена целевая выборка балок с поперечным армированием из керамзита или близких ему по свойствам пористых заполнителей. Выполнен расчёт отобранных образцов по различным методикам с последующей статистической обработкой результатов. Данный расчет позволил оценить степень соответствия нормативных моделей экспериментальным данным и выявить особенности их применения к конструкциям из легких бетонов. По итогам анализа обоснована необходимость дальнейшего изучения влияния основных конструктивных и физико-механических параметров на сопротивление керамзитобетонных балок срезу. Обоснована необходимость применения численного моделирования, в частности применения программного комплекса SIMULIA Abaqus и натурного эксперимента.

Ключевые слова: керамзитобетон, легкий бетон, бетон нормального веса, сопротивление срезу, поперечное армирование, методики расчета, экспериментальная база данных.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF THE SHEAR RESISTANCE OF REINFORCED EXPANDED-CLAY CONCRETE BEAMS WITH TRANSVERSE REINFORCEMENT

P. V. Krivitskiy, A. A. Nevдах

Abstract

The article examines the results of assessing the applicability of current methods for calculating the shear resistance under transverse forces of reinforced concrete beams made of structural expanded-clay concrete with transverse reinforcement. The relevance of the topic stems from the broad prospects for the use of lightweight concretes in load-bearing structures, which at the same time combine the characteristics of enclosing structures. However, the topic remains insufficiently studied: there are no design methods that account for the structural features of lightweight concretes. The structure of lightweight concrete, determined by the presence of porous aggregate, governs the specific features of its behaviour under transverse forces.

A review of research on structural expanded-clay concrete is carried out, including the contribution of the national scientific school to the study of its physical and mechanical properties and to the development of methods for calculating reinforced concrete structures, in particular shear resistance. The design models of shear resistance embodied in domestic and foreign normative documents are systematized, and the ways of accounting for the features of lightweight concrete are noted. An extensive experimental database of test results for beam specimens made of lightweight concretes has been compiled, from which, according to a number of principal criteria, a target sample of beams with transverse reinforcement made of expanded clay or porous aggregates similar to it in properties has been selected. The selected specimens were calculated by various methods with subsequent statistical processing of the results. This calculation made it possible to assess the degree of agreement between the normative models and the experimental data and to identify the features of their application to lightweight concrete structures. Based on the analysis, the need for further study of the influence of the principal structural and physical-mechanical parameters on the shear resistance of expanded-clay concrete beams is substantiated. The need for applying numerical modelling, in particular the use of the SIMULIA Abaqus software package, and a full-scale experiment is justified.

Keywords: expanded-clay concrete, lightweight concrete, normal-weight concrete, shear resistance, transverse reinforcement, design methods, experimental database.

Введение

Керамзит – это обжиговый материал с большим количеством замкнутых пор, обладающий достаточной прочностью для применения в несущих конструкциях. Конструкционный керамзитобетон представляет собой достойную альтернативу бетону нормального веса в промышленном и гражданском строительстве. Конструкционный керамзитобетон – это бетон, используемый в несущих и ограждающих конструкциях зданий, сооружений и обеспечивающий, главным образом,

прочность, жесткость, трещиностойкость конструкций. Высокопрочный керамзитобетон наиболее широко применяется для изготовления крупноразмерных и большепролетных конструкций.

Легкий бетон является сложным многофункциональным материалом, который должен иметь плотную, сплошную структуру, минимальную плотность, достаточную прочность, чтобы обеспечить требуемую несущую способность, а также отличаться повышенной устойчивостью к воздействиям атмосферных осадков. Применение

Строительство

<https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-140-2-15-22>

пористого заполнителя обеспечивает целый ряд преимуществ: снижение собственного веса конструкций; уменьшение нагрузки на другие нижележащие конструкции и материалоемкость каркаса в целом; улучшение теплоизоляционных характеристик, что делает несущие и ограждающие элементы более энергоэффективными. В Республике Беларусь наибольшее распространение получило производство керамзитового гравия с высокими физико-механическими свойствами и характеристиками. Налаженное производство качественного керамзита на отечественных предприятиях создаёт предпосылки для расширения области применения керамзитобетона.

Современная нормативная база, регламентирующая применение конструкционного бетона в Республике Беларусь, основана на СТБ 2674-2025 «Бетоны конструкционные» [1] и СТБ 1187-2020 «Бетоны легкие» [2].

Специалистами РУП «Институт БелНИИС» были подготовлены рекомендации по подбору составов, изготовлению и применению модифицированных конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетонов [3] (руководитель разработки – к. т. н. Н. С. Протыко), обобщающие результаты исследований физико-механических характеристик материалов от различных заводов-изготовителей Республики Беларусь. Данное практическое руководство использовалось при разработке составов и испытаниях опытных образцов ряда последующих исследований.

Значительный вклад в изучение технологии и свойств лёгких бетонов внёс С. М. Ицкович, чьи работы о крупнопористом бетоне [4] и заполнителях для бетона [5] заложили основу для дальнейших исследований конструкционных бетонов на пористых заполнителях.

Исследования физико-механических свойств конструкционного керамзитобетона белорусского производства наиболее полно представлены в работах научной группы под руководством д. т. н., профессора С. Д. Семенюка. С 2012 года коллективом была сформирована экспериментальная база по прочностным и деформативным характеристикам керамзитобетонов на основе сырья отечественных заводов. В частности, Э. А. Кетнером и С. Д. Семенюком проведены испытания шести серий образцов классов LC 8/10–LC 30/33, изготовленных с применением керамзита производства ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукмоль», ЗАО «Лидский керамзитовый завод» и ОАО «Петриковский керамзитовый завод»: определены коэффициенты цилиндрической и призмной прочности, модули продольных, поперечных и сдвиговых деформаций [6]. В работе С. Д. Семенюка и В. А. Ржевуцкой [7] исследовано влияние состава заполнителя на прочность и деформативность керамзитобетона при кратковременном центральном сжатии, установлены пределы верхнего и нижнего микротрещинообразования и коэффициент Пуассона.

Ряд работ коллектива посвящён вопросу оценки усадочных деформаций армированного керамзитобетона. С. Д. Семенюком, Ю. Г. Москальковой и В. А. Ржевуцкой исследованы особенности

стесненной усадки керамзитожелезобетона [8]; в смежной работе Ю. Г. Москальковой и В. А. Ржевуцкой выполнен сравнительный анализ расчётных моделей полной усадки лёгкого бетона применительно к керамзитобетону [9].

Существенный вклад в развитие методов расчёта железобетонных конструкций, в частности сопротивления срезу, внесли отечественные исследователи. Определяющую роль сыграли профессора Т. М. Пецольд и В. В. Тур, под руководством которых разработан СНБ 5.03.01-02 [10]. Также итогом их совместной работы стало учебное пособие с изложением деформационной модели расчёта прочности элементов при действии изгибающих моментов, продольных и поперечных сил [11]. Опыт перехода к проектированию по европейским нормам обобщён в работах профессора Н. А. Рак [12]. Огромный вклад по расчёту железобетонных элементов на действие поперечных сил внесли исследования профессора О. А. Рочника [13], также существенный вклад в разработку расчётных моделей прочности, трещиностойкости и деформативности железобетонных конструкций внесли Н. П. Блещик, Д. Н. Лазовский и В. Н. Деркач.

Отдельное направление отечественных исследований составляет сопротивление железобетонных элементов действию поперечных сил. Этим вопросам посвящены работы В. Н. Малиновского – в том числе по работе элементов с отогнутой арматурой и по расчёту наклонных сечений [14], – а также исследования П. В. Образцова и Н. Н. Яромича. Также В. В. Бондарем совместно с Н. А. Раком проведены исследования в области сопротивления местному сжатию элементов из лёгкого бетона, в частности керамзитобетона [15].

Таким образом, отечественными учёными заложена теоретическая и экспериментальная основа в области свойств конструкционного керамзитобетона и его нормирования. Вместе с тем, специфическая структура керамзитобетона, обусловленная наличием пористого заполнителя, предполагает особенности его работы при действии поперечных сил. Поведение простых разрезных однопролетных балок из данного материала при срезе, в частности, сопротивление элементов с поперечным армированием, остаётся недостаточно изученным, что и определяет актуальность настоящего исследования.

Расчётные модели сопротивления срезу

Действующие отечественные и зарубежные нормы учитывают особенности лёгких бетонов преимущественно через систему понижающих коэффициентов и ограничений прочности, привязанных к плотности или прочности материала. В предшествующей работе [16] был выполнен развёрнутый обзор расчётных моделей определения прочности наклонных сечений железобетонных элементов, представленных в нормативной литературе. В таблице 1 приведена систематизация рассматриваемых документов с указанием типа расчётной модели и способа учёта особенностей лёгкого бетона.

Таблица 1 – Расчётные модели сопротивления срезу и учёт особенностей лёгкого бетона

Нормативный документ	Тип расчётной модели	Учёт особенностей лёгкого бетона
СП 5.03.01-2020 [17], ТКП EN 1992-1-1-2009 [18]	Ферменная аналогия	Понижающий коэффициент ν_x в зависимости от плотности и прочности; замена f_{ck}
СНиП 2.03.01-84 [19], СП 63.13330.2018 [20]	Предельного равновесия	Коэффициенты ϕ_{b2} и ϕ_{b3} , дифференцированные по марке средней плотности (D1800 и менее / D1900 и более)
fib Bulletin 56: Model Code 2010 [21]	MCFT, уровни аппроксимации II–III	Замена f_{ck} на сниженное значение согласно fib Bulletin 55 [22]
fib Model Code 2020 [23]	MCFT, уровни аппроксимации IIa–IIb	Замена f_{ck} ; коэффициент шероховатости критической трещины $k_{atg} = 2,0$ для лёгкого бетона
ACI 318-19 [24]	Полуэмпирическая	Коэффициент модификации $\lambda = 0,75$ для лёгкого бетона
BS 8110-1:1997 [25]	Эмпирическая	Ограничение расчётного напряжения среза ν_c до 0,8 от табличного значения; значения для лёгкого бетона по BS 8110-2:1985 [26]
CSA A23.3-04 [27]	MCFT (упрощённая)	Коэффициент модификации плотности $\lambda = 0,75 - 0,85$
JSCE №15 [28]	Эмпирическая	Расчётная прочность принимается равной 70% от прочности бетона нормального веса при отсутствии фактических данных
NZC 3101-1 [29]	Эмпирическая	Замена $\sqrt{f_c}$ через среднюю прочность на растяжение либо коэффициент 0,75-0,85 $\sqrt{f_c}$; для бетонов по NZS 3152:1974 [30]

Рассмотренные методики различаются особенностями учета конструктивных и физико-механических параметров, определяющих сопротивление наклонного сечения срезу. К числу ключевых параметров относятся прочность легкого бетона на сжатие f_{lk} , пролет среза a/d , рабочая высота сечения d , коэффициент продольного армирования ρ_s и коэффициент поперечного армирования ρ_{sv} .

Следует отметить, что данные расчетные модели в большинстве своем не учитывают состав легкого бетона, тип заполнителя и ограничиваются лишь применением понижающих коэффициентов или ограничением прочности легкого бетона.

База экспериментальных данных

На данном этапе работы была сформирована обширная база данных результатов экспериментальных исследований балочных образцов из легких бетонов, выполненных зарубежными и отечественными авторами [31–39], представленная в таблице 2. В неё вошли железобетонные балки на различных видах легких крупных заполнителей (керамзит, вспученный сланец, вспученный доменный шлак и др.), отличающиеся схемами армирования, геометрическими характеристиками сечения и типом нагружения. Все образцы имели прямоугольное поперечное сечение.

Таблица 2 – Распределение различных параметров в железобетонных балках из легкого бетона

b , мм	Range	≤ 50	50...100	100...150	150...200	200...250	250...300	> 300	–	Всего
	ALWC	–	–	–	26	–	–	–	–	26
	SLWC	–	24	35	29	1	–	6	–	95
d , мм	Range	≤ 100	100...200	200...300	300...400	400...500	> 500	–	–	Всего
	ALWC	–	–	22	4	–	–	–	–	26
	SLWC	24	1	26	38	6	–	–	–	95
a/d	Range	$\leq 2,0$	2,0...2,5	2,5...3,0	3,0...3,5	3,5...4,0	4,0...4,5	4,5...5,0	$> 5,0$	Всего
	ALWC	1	4	–	20	–	–	1	–	26
	SLWC	23	40	9	18	1	–	4	–	95
ρ_s , %	Range	$\leq 0,5$	0,5...1,0	1,0...2,0	2,0...3,0	3,0...4,0	4,0...5,0	$> 5,0$	–	Всего
	ALWC	–	–	3	15	–	8	–	–	26
	SLWC	–	4	47	16	24	4	–	–	95
ρ_{sv} , %	Range	0	0...0,25	0,25...0,5	0,5...0,75	0,75...1,0	1,0...1,5	$> 1,5$	–	Всего
	ALWC	–	–	–	–	–	–	–	–	0
	SLWC	91	2	13	9	2	2	2	–	121
f_{cm} , МПа	Range	≤ 10	10...20	20...30	30...40	40...50	50...60	60...70	> 70	Всего
	ALWC	–	–	12	9	2	2	–	1	26
	SLWC	–	26	21	11	33	4	–	–	95

Примечание – ALWC – all-lightweight concrete (полностью легкий бетон) – состоит из легких заполнителей, как для крупного, так и мелкого заполнителя;

SLWC – sand-lightweight concrete (легкий бетон с песком) – включает легкий крупный заполнитель; обычный мелкий заполнитель (песок).

Поскольку предметом настоящего исследования является работа балок из керамзитобетона с поперечным армированием, из общего массива данных в итоговую базу (таблица 3) включены образцы с учётом совокупности факторов, обеспечивающих сопоставимость образцов с предметом исследования [31–33]. Основным критерием

служило наличие поперечного армирования, но также учитывались состав бетона, схема нагружения, характер разрушения и полнота приведённых в источнике данных. База данных предназначена для оценки применимости расчётных моделей к железобетонным балкам из керамзитобетона с поперечным армированием.

Таблица 3 – Распределение ключевых параметров в базе экспериментальных данных

Параметр	Обозначение	Диапазон значений
Высота сечения	h	120...400 мм
Рабочая высота	d	100...362 мм
Относительный пролет среза	a/d	2,0...4,0
Прочность бетона на сжатие	f_{cm}	13,9...52,3 МПа
Кэф. продольного армирования	ρ_s	1,75...3,85 %
Кэф. поперечного армирования	ρ_{sv}	0,10...0,90 %

Статистическая оценка расчетных моделей

Сформированная база экспериментальных данных послужила основой для валидации существующих нормативных и теоретических моделей сопротивления срезу железобетонных балок с поперечным армированием.

Валидация проводилась путем сопоставления экспериментальных значений перерезывающей силы при разрушении (V_{Exp}) с расчетными значениями (V_{Rd}), полученными по пяти различным моде-

лям (ТКП EN 1992-1-1-2009 [18], СП 5.03.01-2020 [17], Model Code 2010 [21], Model Code 2020 [23] и СП 63.13330.2018 [20]).

Все расчёты выполнены по средним, фактически измеренным в эксперименте прочностям бетона и арматуры при частных коэффициентах безопасности $\gamma_c = \gamma_s = 1$. Это убирает заложенный в нормы проектный запас и позволяет оценивать точность самой модели. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Экспериментальные и расчетные значения сопротивления срезу отобранных образцов из экспериментальной базы

Источник	Эксперимент 1 – Аль-Хужейри Х.М. [31]	Эксперимент 2 – С. Li et al. [32]	Эксперимент 3 – М. Medhlohm [33]
Кол-во образцов	12	10	6
V_{Exp} , кН	19,5–30,0	156,0–201,0	33,0–77,0
V_{Rd} по ТКП EN 1992-1-1-2009 [15]	14,89–22,50	58,63–96,03	19,33–35,15
V_{Rd} по СП 5.03.01-2020 [14]	13,59–19,74	58,63–96,03	19,33–35,15
V_{Rd} по Model Code 2010 [18]	18,71–28,81	89,59–97,83	21,37–27,29
V_{Rd} по Model Code 2020 [20]	15,55–23,67	88,50–95,80	20,50–26,46
V_{Rd} по СП 63.13330.2018 [17]	24,72–36,96	222,90–322,21	59,75–68,71

Статистическая обработка выполнена по приложению Г СН 2.01.01-2022 [40]. Для каждого образца сопоставляются экспериментальное сопротивление r_e (соответствует V_{Exp}) и прогнозируемое значение r_i , вычисленное по функции сопротивления соответствующей нормы $g_n(X)$ (соответствует V_{Rd}). Для каждой модели вычислялись средний поправочный коэффициент b , характеризующий систематическое смещение модели, значение вектора ошибки для каждого образца δ_i , коэффициент вариации погрешности V_δ и угол систематического отклонения $\theta = \arctg b$ (при $\theta > 45^\circ$ ($b > 1$) модель недооценивает несущую способность; при $\theta < 45^\circ$ – напротив,

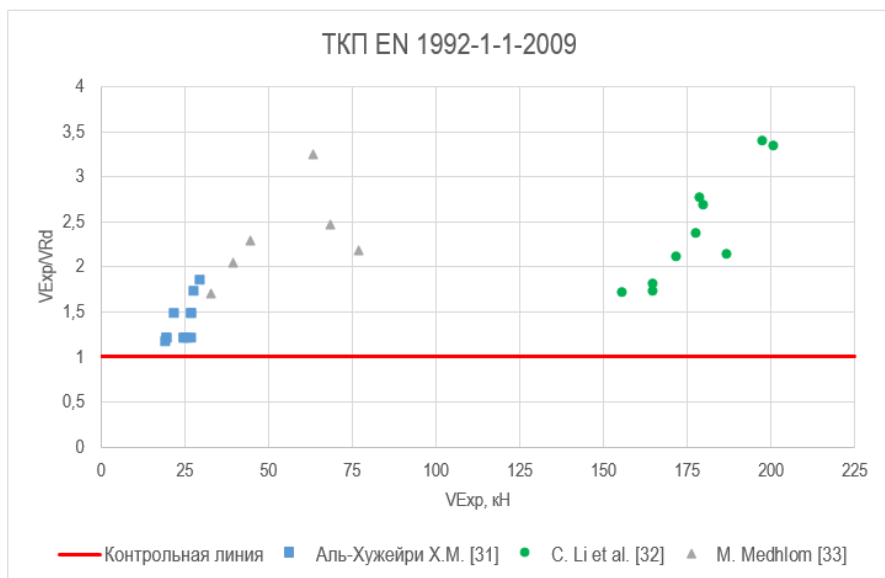
переоценивает. Дополнительно для каждой нормы вычислено среднее отношение $\bar{\lambda} = V_{Exp}/V_{Rd}$. Показатели рассчитаны по всему массиву отобранных образцов, результаты сведены в таблицу 5.

На рисунках 1-3 отношение $\lambda = V_{Exp}/V_{Rd}$ показано в зависимости от уровня экспериментальной поперечной силы V_{Exp} для каждой из рассмотренных норм. Горизонтальная контрольная линия $\lambda = 1$ отвечает точному совпадению расчёта с экспериментом и разделяет две качественно разные области – область запаса ($\lambda > 1$) и область переоценки ($\lambda < 1$).

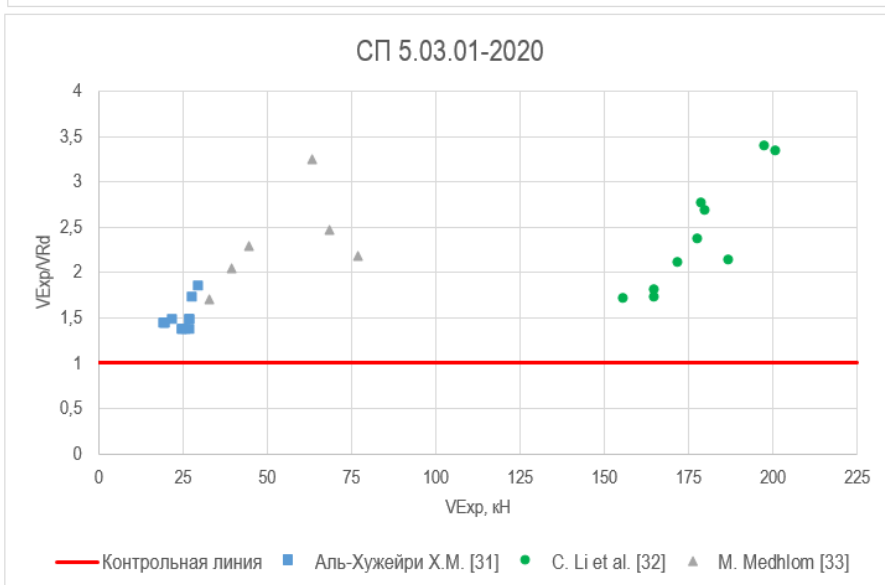
Таблица 5 – Статистические показатели соответствия расчётных моделей опытным данным

Нормативный документ	n	b	θ	V_δ	$\bar{\lambda}$	COV(λ)
ТКП EN 1992-1-1-2009 [18]	28	2,157	65,12°	0,350	1,94	35,09 %
СП 5.03.01-2020 [17]		2,172	65,28°	0,299	1,99	31,48 %
Model Code 2010 [21]		1,840	61,48°	0,385	1,61	37,78 %
Model Code 2020 [23]		1,905	62,23°	0,309	1,73	32,07 %
СП 63.13330.2018 [20]		0,689	34,57°	0,167	0,77	17,63 %

а)

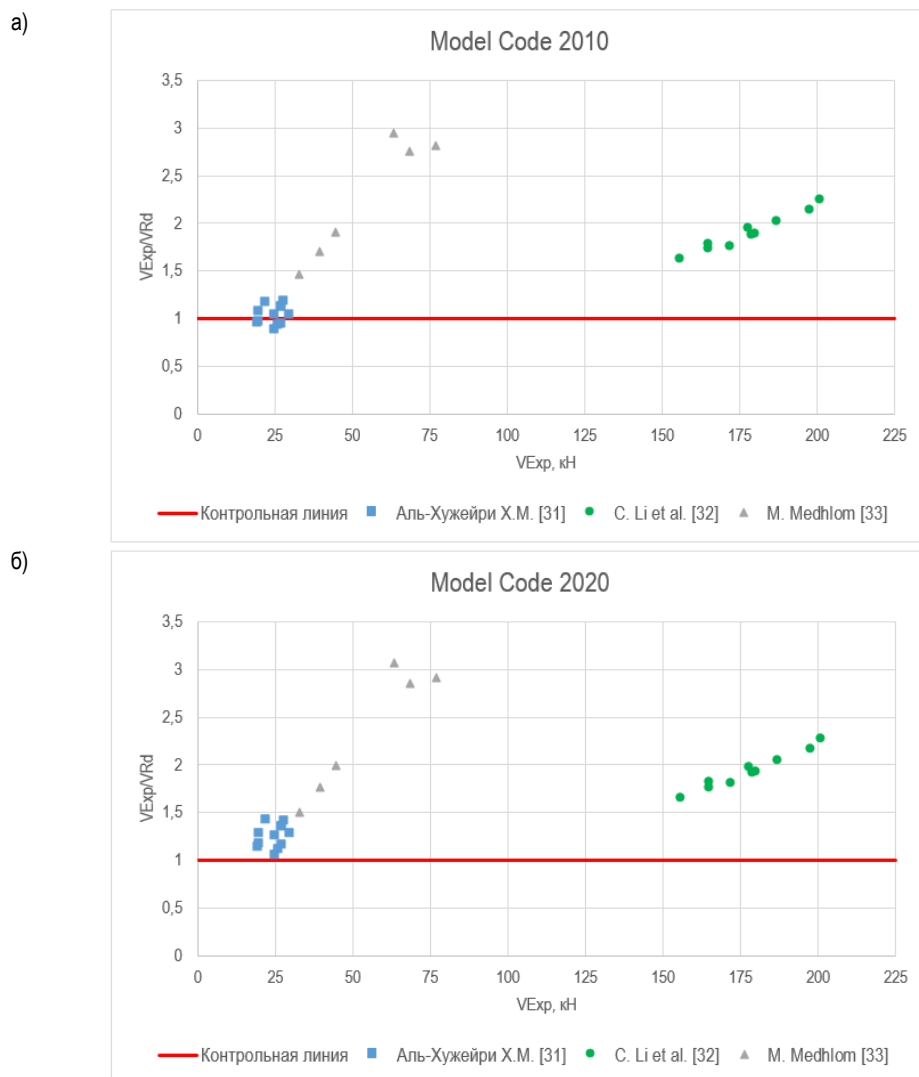


б)

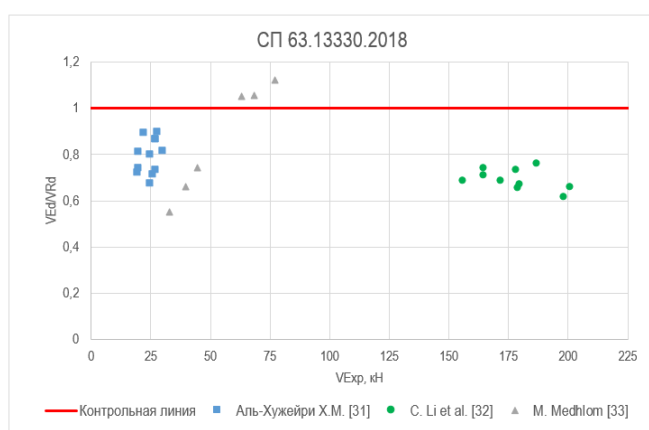


а) диаграмма для ТКП EN 1992-1-1-2009 [18]; б) то же для СП 5.03.01-2020 [17]

Рисунок 1 – Отношение $\lambda = V_{Exp}/V_{Rd}$ в зависимости от V_{Exp}



а) диаграмма для Model Code 2010 [21]; б) то же для Model Code 2020 [23]

Рисунок 2 – Отношение $\lambda = V_{Exp}/V_{Rd}$ в зависимости от V_{Exp} **Рисунок 3** – Отношение $\lambda = V_{Exp}/V_{Rd}$ в зависимости от V_{Exp} : диаграмма для СП 63.13330.2018 [19]

Результаты заметно различаются в зависимости от нормативных документов. ТКП EN 1992-1-1-2009 [18] и СП 5.03.01-2020 [17] дают наиболее выраженную заниженную оценку прочности: поправочный коэффициент b равен 2,16 и 2,17, угол систематического отклонения θ – 65,12° и 65,28°, коэффициент вариации V_δ – 0,35 и

0,30 соответственно. Фактическая несущая способность почти вдвое превышает расчетную ($\bar{\lambda}$ равна 1,94 и 1,99), что подтверждает консерватизм данных норм в отношении легких бетонов.

Схожая ситуация в Model Code 2010 [21] и Model Code 2020 [23], данные модели также занижают прочность и имеют большое рассеивание результатов: b – 1,84 и 1,91; θ – 61,48° и 62,23°; V_δ – 0,39 и 0,31 соответственно. Расчет устойчиво недооценивает прочность, но степень недооценки колеблется от образца к образцу.

Расчет по СП 63.13330.2018 [19] показал обратный эффект: нормы систематически переоценивают несущую способность (поправочный коэффициент $b = 0,69$ ($\theta = 34,57^\circ < 45^\circ$)). При этом модель показала наименьший разброс значений ($V_\delta = 0,17$).

Также необходимо отметить, что в базе образцов присутствуют образцы с фиброй. Однако в целом, фибровые образцы не выпадают из общего поля рассеяния и не меняют качественной картины сопоставления, что позволяет рассматривать их в рамках единой базы с оговоркой о неучтённом вкладе фибрового армирования.

Полученная картина показывает следующее: ни одна из моделей не обеспечивает надёжного прогноза сопротивления керамзитобетонных балок срезу. Все эти модели откалиброваны на бетоне нормального веса, где значительная часть перерезывающих усилий передаётся зацеплением по берегам наклонной трещины по крупному заполнителю. В керамзитобетоне трещина проходит сквозь пористый заполнитель, а не огибает его, что снижает вклад зацепления – механизм, нормами напрямую не учитываемый.

Численное моделирование и натурный эксперимент

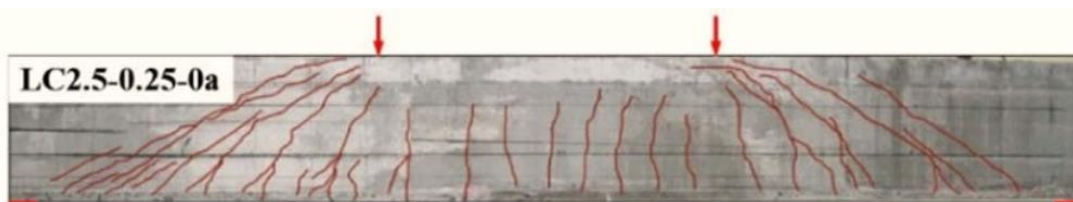
Полученные результаты ставят закономерный вопрос: какие именно факторы в наибольшей степени определяют сопротивление керамзитобетонных балок срезу и как при варьировании этих параметров меняется сам механизм их разрушения. Для ответа на данный вопрос необходим контролируемый эксперимент, в котором интересующие параметры будут варьироваться поочередно при прочих равных условиях.

Реализация такой объемной программы исследований потребовала бы изготовления и испытания большого числа образцов. Поэтому в качестве вспомогательного инструмента параметрического исследования выбрано численное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе SIMULIA Abaqus. Его широкие возможности позволяют воспроизвести нелинейную работу железобетонного элемента до разрушения, проследить зарождение и развитие наклонных трещин и оценить вклад отдельных факторов

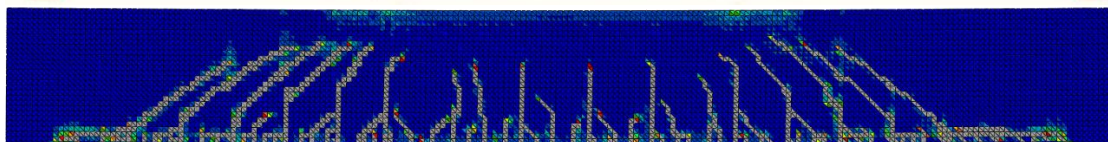
при поочередном их изменении. Однако численная модель остаётся достоверной лишь в рамках строго заданных, жёстких и контролируемых параметров. Поэтому её разработка неотделима от натурного эксперимента, который служит одновременно источником эталонных данных для верификации и средством контроля адекватности расчётной модели. Использование численного моделирования позволит сузить и обосновать программу натурных испытаний, сосредоточив их на наиболее значимых факторах.

На первом этапе разработанная конечно-элементная модель прошла апробацию на балках из лёгкого бетона, испытания которых описаны в [32] и [33]. Поведение бетона описывалось моделью повреждаемой пластичности Concrete Damaged Plasticity (CDP), решение выполнялось в квазистатической постановке (Dynamic, Implicit). Модель корректно воспроизвела не только несущую способность образцов, но и качественную картину их разрушения — траекторию наклонной трещины, её развитие и зону исчерпания прочности (рисунок 4).

а)



б)



а) фото эксперимента из статьи [32], б) моделирование в SIMULIA Abaqus
Рисунок 4 – Сопоставление характера разрушения балки LC2.5-0.25-0a

Параллельно была выполнена подготовка программы натурного эксперимента на опытных балках из керамзитобетона с поперечным армированием (рисунок 5). Натурные испытания обеспечивают получение достоверных опытных данных по работе керамзитобетонных балок на срез и служат основой для окончательной верификации численной модели на образцах собственного изготовления.



Рисунок 5 – Общий вид испытательной установки с опытным образцом

Таким образом, верифицированная на независимых данных численная модель в сочетании с программой натурных испытаний образует основу для последующего систематического анализа влияния ключевых параметров на сопротивление керамзитобетонных балок срезу.

Заключение

Керамзитобетон является перспективным конструкционным материалом. Вместе с тем, сопротивление керамзитобетонных балок с поперечным армированием срезу остаётся недостаточно изученным.

Анализ различных расчётных моделей показал отсутствие единой и универсальной методики расчёта сопротивления срезу, а также факт того, что особенности лёгкого бетона учитываются в них лишь косвенно – через понижающие коэффициенты и ограничения прочности, привязанные к плотности материала, а не через описание реального механизма его работы.

Для количественной оценки была сформирована обширная база экспериментальных данных, из которой выделена целевая выборка балок. Расчёт 28 образцов по пяти методикам и статистическая обработка результатов показали следующее: методики на основе ферменной аналогии и теории полей сжатия идут в значительный запас, занижая несущую способность в полтора-два раза (поправочный коэффициент b составляет от 1,84 для Model Code 2010 до 2,17 для СП 5.03.01-2020, а среднее отношение $\lambda = V_{Exp}/V_{Rd}$ достигает 1,9–2,0), тогда как модель предельного равновесия СП 63.13330.2018 завышает прочность ($b = 0,69$, $\bar{\lambda} = 0,77$), при этом демонстрируя наименьший разброс результатов ($V_{\delta} = 0,167$). Таким образом, ни одна из рассмотренных моделей не обеспечивает надёжный прогноз в работе керамзитобетонных балок на срез.

Основные предпосылки такого поведения в том, что все рассмотренные модели откалиброваны на бетоне нормального веса, в котором значительная доля перерезывающих усилий передаётся зацеплением по берегам наклонной трещины. В керамзитобетоне же трещина проходит сквозь пористый заполнитель, а не огибает его, что снижает вклад зацепления – механизм, напрямую нормами не учитываемый.

Установленный значительный разброс результатов расчета обуславливает необходимость дальнейших исследований, основой которых служит натурный эксперимент как источник достоверных данных о работе керамзитобетонных балок на срез. На предварительном этапе необходимо выполнить численное моделирование методом конечных элементов в программном комплексе SIMULIA

Abaqus, позволяющее выявить параметры, в наибольшей степени влияющие на сопротивление срезу, и тем самым обосновать программу испытаний. Разработанная конечно-элементная модель прошла апробацию на балках из лёгкого бетона и корректно воспроизвела как их несущую способность, так и качественную картину разрушения. Тем самым верифицированная на независимых данных численная модель в сочетании с подготовленной программой натурных испытаний образует методическую основу для последующего систематического анализа влияния различных параметров на сопротивление керамзитобетонных балок срезу, результаты которого будут представлены в отдельной работе.

Список цитированных источников

1. Бетоны конструкционные. Технические условия = Бетоны конструкційні. Технічні умови : СТБ 2674-2025. – Взамен СТБ 1544-2005, СТБ EN 206-2016 ; введ. 01.03.2026. – Минск : Госстандарт, 2025. – 48 с.
2. Бетоны легкие. Технические условия = Бетоны легкія. Технічні умови : СТБ 1187-2020. – Взамен СТБ 1187-99 ; введ. 01.11.2020. – Минск : Госстандарт РБ, 2020. – 25 с.
3. Рекомендации по подбору составов, изготовлению и применению модифицированных химическими и минеральными добавками конструкционно-теплоизоляционного и конструкционного керамзитобетон : Р 1.03.118-2013 : срок действия с 15.11.2013 / Институт БелНИИС. – Минск : Стройтехнорм, 2013. – 37 с.
4. Ицкович, С. М. Крупнопористый бетон (Технология и свойства) / С. М. Ицкович. – М. : Стройиздат, 1977. – 119 с.
5. Ицкович, С. М. Заполнители для бетона / С. М. Ицкович. – Минск : Вышэйшая школа, 1983. – 217 с.
6. Семенюк, С. Д. Прочностные и деформативные характеристики керамзитобетон на основе сырья заводов Республики Беларусь / С. Д. Семенюк, Э. А. Кетнер // Инновационная подготовка инженерных кадров на основе европейских стандартов (Еврокодов) : материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 30 мая 2017 г. / [редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа]. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 178–190.
7. Семенюк, С. Д. Влияние компонентов легкого бетона на прочностные и деформативные характеристики / С. Д. Семенюк, В. А. Ржевуцкая // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2018. – № 4 (61). – С. 102–109.
8. Семенюк, С. Д. Особенности определения стесненной усадки керамзитожелезобетона / С. Д. Семенюк, Ю. Г. Москалькова, В. А. Ржевуцкая // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр-во. Прикладные науки. – 2020. – № 8. – С. 58–65.
9. Ржевуцкая, В. А. Относительные деформации полной усадки керамзитобетона / В. А. Ржевуцкая, Ю. Г. Москалькова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр-во. Прикладные науки. – 2021. – № 16. – С. 99–105.
10. Бетонные и железобетонные конструкции : СНБ 5.03.01-02. – Взамен СНиП 2.03.01-84* ; введ. 20.06.2002. – Минск : Минстройархитектуры, 2003. – 174 с.
11. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования : учебное пособие для студентов строительных специальностей // Н. П. Блещик, Д. Д. Жуков, Д. Н. Лазовский [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2003. – 380 с.
12. Пецольд, Т. М. Опыт внедрения в Республике Беларусь европейских нормативных документов по проектированию железобетонных конструкций / Т. М. Пецольд, В. В. Тур, Н. А. Рак // Строительная наука и техника. – 2012. – № 2-С. – С. 94–96.
13. Васильев, П. И. Сопротивление железобетонных элементов поперечным силам / П. И. Васильев, О. А. Рочняк. – Минск : Наука и техника. – 1978. – 88 с.
14. Рочняк, О. А. Прочность балок с отогнутой стержневой арматурой при действии поперечных сил / О. А. Рочняк, В. Н. Малиновский // Бетон и железобетон. – 1985. – № 5. – С. 33–34.
15. Бондарь, В. В. Деформации элементов из легкого бетона в условиях концентричного местного сжатия / В. В. Бондарь, Н. А. Рак // Инновации в бетоне: сборник статей по материалам Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со дня рождения И. Н. Ахвердова и С. С. Атаева, Минск, 9–10 июня 2016 г. : в 2 ч. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: Э. И. Батяновский, В. В. Бабицкий. – Минск, 2016. – Ч. 2. – С. 44–50.
16. Модели сопротивления срезу балочных элементов из легких бетонов с продольным и поперечным армированием / П. В. Кривицкий, А. А. Невдах, И. В. Ткачук [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2024. – № 1 (133). – С. 40–47. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-41-47.
17. Бетонные и железобетонные конструкции = Бетонныя і жалезабетонныя канструкцыі : СП 5.03.01-2020. – Взамен СНиП 2.03.01-84*, СНБ 5.03.01-02 ; введ. 20.05.2022. – Минск : Стройтехнорм, 2022. – 244 с.
18. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Общие правила и правила для зданий = Еўракод 2. Праектаванне жалезабетонных канструкцый. Агульныя правы і правы для будынкаў : ТКП EN 1992-1-1-2009. – Введ. 01.09.2019. – Минск : Стройтехнорм, 2021. – Ч. 1-1. – 310 с.
19. Бетонные и железобетонные конструкции : СНиП 2.03.01-84*. – Введ. 01.01.1986. – М. : НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. – 82 с.
20. Бетонные и железобетонные конструкции : СП 63.13330.2018. – Введ. 20.06.2019. – М. : НИЦ Строительство, 2019. – 124 с.
21. Model Code 2010. First complete draft. Fib Bulletin. – Lausanne, 2010. – Vol. 2, No. 56. – 293 p.
22. Model Code 2010. First complete draft. Fib Bulletin. – Lausanne, 2010. – Vol. 1, No. 55. – 297 p.
23. Fib Model Code for Concrete Structures 2020. Final draft. – May 2023. – 1256 p.
24. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19). – Michigan, 2019. – 628 p.
25. Structural use of Concrete – Code of practice for design and construction. BS 8110-1:1997. – London, 1997. – Part 1. – 160 p.
26. Structural use of Concrete – Code of practice for special circumstances. BS 8110-2:1985. – London, 1985. – Part 2. – 68 p.
27. Design of concrete structures. CSA A23.3-04. – Canada, 2004. – 232 p.
28. Standard specifications for concrete structures – 2007. "Design". JSCE Guidelines for concrete No. 15. – Japan, 2007. – 502 p.
29. Concrete structures standard – The design of concrete structures. NZC 3101-1. – Wellington, 2006. – 309 p.
30. Specification for the manufacture and use of structural and insulating lightweight concrete – Metric Units. NZS 3152:1974. – Wellington, 1974. – 23 p.
31. Аль-Хужейри, Х. М. Прочность и трещиностойкость наклонных сечений керамзитобетонных балок и их прогибы с учетом сдвиговых деформаций : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Халед Махмуд Аль-Хужейри ; Ростовский гос. строит. ун-т. – Воронеж, 1997. – 27 с.
32. Effect of Steel Fiber Content on Shear Behavior of Reinforced Expanded-Shale Lightweight Concrete Beams with Stirrups / C. Li, M. Zhao, X. Zhang [et al.] // MDPI. – 2021. – Vol. 14. – Paper 1107. – DOI: 10.3390/ma14051107.
33. Mu'taz, K. Laboratory investigation of shear repair of reinforced lightweight aggregate concrete beams with stirrups / K. Mu'taz, M. Medhlohm // Journal of Engineering and Sustainable Development. 2021. – Vol. 19 (4). – P. 20.
34. Ivey, Don L. Shear Capacity of Lightweight Concrete Beams / Don L. Ivey, Eugene Buth // ACI Journal. – 1967. – Vol. 64. – P. 634–643.
35. Hanson, J. A. Shear Strength of Lightweight Reinforced Concrete Beams / J. A. Hanson // Journal of the American Concrete Institute. – 1957. – Vol. 55. – P. 387–403.
36. Shear Testing of Steel Fiber-Reinforced Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcement / T. H.-K. Kang, W. Kim, Y.-K. Kwak, S.-G. Hong // ACI Structural Journal. – 2011. – Vol. 108. – P. 553–561.
37. Effect of Aggregate Size on Shear Behavior of Lightweight Concrete Continuous Slender Beams / K.-H. Yang, J.-I. Sim, B.-J. Choi, E.-T. Lee // ACI Materials Journal. – 2011. – Vol. 108. – P. 501–509.
38. Testing and Prediction of Shear Performance for Steel Fiber Reinforced Expanded-Shale Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcements / X. Li, C. Li, M. Zhao [et al.] // MDPI. – 2019. – Vol. 12 (10). – Paper 1594. – DOI: 10.3390/ma12101594.
39. Cho, S. Effect of Aggregate Type on the Shear Behavior of Reinforced Lightweight Concrete Beams / S. Cho, M. O. Kim // MDPI. – 2024. – Vol. 14 (14). – Paper 5992. – <https://doi.org/10.3390/app14145992>.

40. Основы проектирования строительных конструкций = Основы проектирования будайных канструкций : СН 2.01.01-2022. – Взамеи СН 2.01.01-2019 ; введ. 09.06.2025. – Минск : Стройтехнорм, 2025. – 65 с.

References

1. Betony konstrukcionnye. Tekhnicheskie usloviya = Betony kanstrukciynyya. Tekhnichnyya ymovy : STB 2674-2025. – Vзамеи STB 1544-2005, STB EN 206-2016 ; введ. 01.03.2026. – Минск : Gosstandart, 2025. – 48 s.
2. Betony legkie. Tekhnicheskie usloviya = Betony legkiya. Tekhnichnyya ymovy : STB 1187-2020. – Vзамеи STB 1187-99 ; введ. 01.11.2020. – Минск : Gosstandart RB, 2020. – 25 s.
3. Rekomendacii po podboru sostavov, izgotovleniyu i primenenyu modifitsirovannyh himicheskimi i mineral'nyimi dobavkami konstrukcionno-teploizolyacionnogo i konstrukcionnogo keramzitobetonov : R 1.03.118-2013 : srok dejstviya s 15.11.2013 / Institut BelNII. – Минск : Strojtekhnorm, 2013. – 37 s.
4. Ickovich, S. M. Krupnoporistyj beton (Tekhnologiya i svoystva) / S. M. Ickovich. – M. : Strojizdat, 1977. – 119 s.
5. Ickovich, S. M. Zapolniteli dlya betona / S. M. Ickovich. – Минск : Vyshejschaya shkola, 1983. – 217 s.
6. Semenyuk, S. D. Prochnostnye i deformativnye karakteristiki keramzitobetonov na osnove syrya zavodov Respubliki Belarus' / S. D. Semenyuk, E. A. Ketner // Innovacionnaya podgotovka inzhenernyh kadrov na osnove evropejskih standartov (Evrokodov) : materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii, Минск, 30 maya 2017 g. / [redkol.: V. F. Zverev, S. M. Koleda]. – Минск : BNTU, 2017. – S. 178–190.
7. Semenyuk, S. D. Vliyaniye komponentov legkogo betona na prochnostnye i deformativnye karakteristiki / S. D. Semenyuk, V. A. Rzhavuckaya // Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta. – 2018. – № 4 (61). – S. 102–109.
8. Semenyuk, S. D. Osobennosti opredeleniya stesnennoj usadki keramzitozhelezobetona / S. D. Semenyuk, YU. G. Moskal'kova, V. A. Rzhavuckaya // Vestn. Poloc. gos. un-ta. Ser. F. Str-vo. Prikladnye nauki. – 2020. – № 8. – S. 58–65.
9. Rzhavuckaya, V. A. Otnositel'nye deformacii polnoj usadki keramzitobetona / V. A. Rzhavuckaya, YU. G. Moskal'kova // Vestn. Poloc. gos. un-ta. Ser. F. Str-vo. Prikladnye nauki. – 2021. – № 16. – S. 99–105.
10. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SNB 5.03.01-02. – Vзамеи SNiP 2.03.01-84* ; введ. 20.06.2002. – Минск : Minstrojarkhitektury, 2003. – 174 s.
11. Zhelezobetonnye konstrukcii. Osnovy teorii, rascheta i konstruirovaniya : uchebnoe posobie dlya studentov stroitel'nyh special'nostej // N. P. Bleshchik, D. D. Zhukov, D. N. Lazovskij [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2003. – 380 s.
12. Pecol'd, T. M. Opyt vnedreniya v Respublike Belarus' evropejskih normativnyh dokumentov po proektirovaniyu zhelezobetonnyh konstrukcij / T. M. Pecol'd, V. V. Tur, N. A. Rak // Stroitel'naya nauka i tekhnika. – 2012. – № 2-S. – S. 94–96.
13. Vasil'ev, P. I. Soprotivleniye zhelezobetonnyh elementov poperechnym silam / P. I. Vasil'ev, O. A. Rochnyak. – Минск : Nauka i tekhnika. – 1978. – 88 s.
14. Rochnyak, O. A. Prochnost' balok s otognutoj sterzhnevoj armaturoj pri dejstvii poperechnykh sil / O. A. Rochnyak, V. N. Malinovskij // Beton i zhelezobeton. – 1985. – № 5. – S. 33–34.
15. Bondar', V. V. Deformacii elementov iz legkogo betona v usloviyah koncentrichnogo mestnogo szhatiya / V. V. Bondar', N. A. Rak // Innovacii v betonovedenii, stroitel'nom proizvodstve i podgotovke inzhenernyh kadrov: sbornik statej po materialam Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoj 100-letiyu so dnya rozhdeniya I. N. Ahverdova i S. S. Ataeva, Минск, 9–10 iyunya 2016 g. : v 2 ch. / Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet ; redkol.: E. I. Batyanovskij, V. V. Babickij. – Минск, 2016. – CH. 2. – S. 44–50.
16. Modeli soprotivleniya srezu balochnyh elementov iz legkih betonov s prodol'nym i poperechnym armirovaniem / P. V. Krivickij, A. A. Nevda, I. V. Tkachuk [i dr.] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2024. – № 1 (133). – S. 40–47. – DOI: 10.36773/1818-1112-2024-133-1-41-47.
17. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii = Betonnyya i zhelezobetonnyya kanstrukcii : SP 5.03.01-2020. – Vзамеи SNiP 2.03.01-84*, SNB 5.03.01-02 ; введ. 20.05.2022. – Минск : Strojtekhnorm, 2022. – 244 s.
18. Evrokod 2. Proektirovaniye zhelezobetonnyh konstrukcij. Obshchie pravila i pravila dlya zdaniy = Eyarakod 2. Praektavanne zhelezobetonnyh kanstrukcij. Agul'nyya pravily i pravily dlya budynkay : TKP EN 1992-1-1-2009. – Vвед. 01.09.2019. – Минск : Strojtekhnorm, 2021. – CH. 1-1. – 310 s.
19. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SNiP 2.03.01-84*. – Vвед. 01.01.1986. – M. : NIIZHB Gosstroya SSSR, 1986. – 82 s.
20. Betonnye i zhelezobetonnye konstrukcii : SP 63.13330.2018. – Vвед. 20.06.2019. – M. : NIC Stroitel'stvo, 2019. – 124 s.
21. Model Code 2010. First complete draft. Fib Bulletin. – Lausanne, 2010. – Vol. 2, No. 56. – 293 p.
22. Model Code 2010. First complete draft. Fib Bulletin. – Lausanne, 2010. – Vol. 1, No. 55. – 297 p.
23. Fib Model Code for Concrete Structures 2020. Final draft. – May 2023. – 1256 p.
24. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and commentary (ACI 318R-19). – Michigan, 2019. – 628 p.
25. Structural use of Concrete – Code of practice for design and construction. BS 8110-1:1997. – London, 1997. – Part 1. – 160 p.
26. Structural use of Concrete – Code of practice for special circumstances. BS 8110-2:1985. – London, 1985. – Part 2. – 68 p.
27. Design of concrete structures. CSA A23.3-04. – Canada, 2004. – 232 p.
28. Standard specifications for concrete structures – 2007. "Design". JSCE Guidelines for concrete No. 15. – Japan, 2007. – 502 p.
29. Concrete structures standard – The design of concrete structures. NZC 3101-1. – Wellington, 2006. – 309 p.
30. Specification for the manufacture and use of structural and insulating lightweight concrete – Metric Units. NZS 3152:1974. – Wellington, 1974. – 23 p.
31. Al'-Huzhejri, H. M. Prochnost' i treshchinost' naklonnyh sechenij keramzitofibrozelezobetonnyh balok i ih progiby s uchedom sdvigovyh deformacij : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.23.01 / Haled Mahmud Al'-Huzhejri ; Rostovskij gos. stroit. un-t. – Voronezh, 1997. – 27 s.
32. Effect of Steel Fiber Content on Shear Behavior of Reinforced Expanded-Shale Lightweight Concrete Beams with Stirrups / C. Li, M. Zhao, X. Zhang [et al.] // MDPI. – 2021. – Vol. 14. – Paper 1107. – DOI: 10.3390/ma14051107.
33. Mu'taz, K. Laboratory investigation of shear repair of reinforced lightweight aggregate concrete beams with stirrups / K. Mu'taz, M. Medhloim // Journal of Engineering and Sustainable Development. 2021. – Vol. 19 (4). – P. 20.
34. Ivey, Don L. Shear Capacity of Lightweight Concrete Beams / Don L. Ivey, Eugene Buth // ACI Journal. – 1967. – Vol. 64. – P. 634–643.
35. Hanson, J. A. Shear Strength of Lightweight Reinforced Concrete Beams / J. A. Hanson // Journal of the American Concrete Institute. – 1957. – Vol. 55. – P. 387–403.
36. Shear Testing of Steel Fiber-Reinforced Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcement / T. H.-K. Kang, W. Kim, Y.-K. Kwak, S.-G. Hong // ACI Structural Journal. – 2011. – Vol. 108. – P. 553–561.
37. Effect of Aggregate Size on Shear Behavior of Lightweight Concrete Continuous Slender Beams / K.-H. Yang, J.-I. Sim, B.-J. Choi, E.-T. Lee // ACI Materials Journal. – 2011. – Vol. 108. – P. 501–509.
38. Testing and Prediction of Shear Performance for Steel Fiber Reinforced Expanded-Shale Lightweight Concrete Beams without Web Reinforcements / X. Li, C. Li, M. Zhao [et al.] // MDPI. – 2019. – Vol. 12 (10). – Paper 1594. – DOI: 10.3390/ma12101594.
39. Cho, S. Effect of Aggregate Type on the Shear Behavior of Reinforced Lightweight Concrete Beams / S. Cho, M. O. Kim // MDPI. – 2024. – Vol. 14 (14). – Paper 5992. – <https://doi.org/10.3390/app14145992>.
40. Osnovy proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij = Asnovy praektavannyya budaynyh kanstrukcij : SN 2.01.01-2022. – Vзамеи SN 2.01.01-2019 ; введ. 09.06.2025. – Минск : Strojtekhnorm, 2025. – 65 s.

Материал поступил 25.06.2026, одобрен 06.07.2026, принят к публикации 06.07.2026