

16. Надольский, В.В. Сравнение уровней надежности обеспечиваемых Еврокодами и стандартами Республики Беларусь (на английском) / В.В. Надольский, М. Голицки, М. Сикора // Вестник МГСУ. – 2013. – № 2. – С. 7–21.
17. Черноиван, А.В. Нормирование ветровой нагрузки на здания и сооружения для климатических условий Республики Беларусь: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / А.В. Черноиван; Брестский государственный технический университет. – Брест, 2012. – 24 с.
18. Надольский, В.В. Особенности статического расчета по ТКП EN 1993-1-1 / В.В. Надольский, Ю.С. Мартынов // Наука, техника и технологии. – 2011. – №4 (37). – С. 38–21.
19. JCSS Probabilistic Model Code, Zurich: Joint Committee on Structural Safety, 2001. Электронный ресурс: <[www.jcss.byg.dtu.dk](http://www.jcss.byg.dtu.dk)>.
20. Тур, В.В. Калибровка значений коэффициентов сочетаний для воздействий при расчетах железобетонных конструкций в постоянных и особых расчетных ситуациях / В.В. Тур, Д.М. Марковский // Строительная наука и техника. – 2009. – № 2 (23). – С. 32–48.
21. Марковский, Д.М. Калибровка значений параметров безопасности железобетонных конструкций с учётом заданных показателей надёжности: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Брест, 2009.
22. Turkstra, C.J. Theory of Structural Design Decisions, SM Studies Series No. 2. Ontario, Canada: Solid Mechanics Division, University of Waterloo. –1970.
23. Holicky, M. Partial Factors for Light-Weight Roofs Exposed to Snow Load / M. Holicky, M. Sykora/In Bris R., Guedes Soares C., Martorell S. (eds.), Supplement to the Proceedings of the European Safety and Reliability Conference ESREL 2009, Prague, Czech Republic, 7–10 September 2009. Ostrava: VŠB Technical University of Ostrava. – 2009. – P. 23–30.

Материал поступил в редакцию 23.03.15

**MARTYNOV Yu.S., NADOLSKI V.V. The introduction of Eurocodes in design practice from the standpoint economy and reliability of steel construction**

The results of comparing the section parameters and levels of reliability of steel structures designed in accordance with European standards (Eurocodes) and SNiP are presented. Deterministic calculations for generalized steel member in terms of the resistance and effects of actions (internal forces) are analyzed. The system of partial factors and combinations are compared. The differences in the rules of combinations of loads are shown. Resistance parameters and the effects of actions are converted into comparable form.

УДК 666.973:620.17

**Бондарь В.В., Рак Н.А.**

## ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНЦЕНТРИЧНОМУ МЕСТНОМУ СЖАТИЮ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ЛЕГКОГО БЕТОНА

**Введение.** Одним из основных направлений развития строительной науки в последние годы существования СССР, в постсоветский период с 1991 по 2000 гг., а также с 2000 года по настоящее время является преимущественное развитие производства изделий и конструкций, обеспечивающих снижение материалоемкости, стоимости и трудоемкости строительства, массы зданий и сооружений и повышения качества строительства.

Вариант решения этой задачи — дальнейшее развитие и более широкое применение эффективных строительных конструкций в ограждающих и частично несущих элементах зданий и сооружений. Для изготовления таких конструкций, наряду с автоклавным ячеистым бетоном, используемым исключительно в ограждающих элементах здания, применяется керамзитобетон, позволяющий повысить степень индустриальности строительства, отчасти снизить его материалоемкость и стоимость.

Современное состояние теории расчета бетонных и железобетонных конструкций, опыт их применения нашли свое отражение в нормах проектирования бетонных и железобетонных конструкций [1]. Необходимо отметить, что указанные нормы по расчету бетонных и железобетонных конструкций, действующие в Республике Беларусь, распространяются на конструкции из бетонов со средней плотностью от 2000 до 2800 кг/м<sup>3</sup>. В связи с этим до сего времени проектирование конструкций из легкого бетона выполняется по нормам бывшего СССР [2].

Однако еще целый ряд вопросов, касающихся расчета и конструирования элементов из легкого бетона, нуждается в дальнейших исследованиях. Одним из таких вопросов является прочность материала неармированных и армированных легкобетонных элементов в сложных напряженных состояниях, например, в условиях местного сжатия. Решение этого вопроса позволит с большей надежностью и

более экономично проектировать узлы сопряжения легкобетонных конструкций каркаса зданий, а также узлы сопряжения элементов каркаса зданий и сооружений из тяжелого бетона с ограждающими и несущими конструкциями из легкого бетона.

Анализ более двух десятков нормативных документов по проектированию железобетонных конструкций показал, что во всех из них регламентирован расчет сопротивления местному сжатию элементов из тяжелого бетона. В то же время расчет сопротивления местному сжатию элементов из легкого бетона регламентирован не во всех из рассмотренных документов. Обзор методов расчета сопротивления местному сжатию элементов из легкого бетона в достаточном подробном виде изложен в статье [3]. Из данного обзора мы можем сделать вывод о том, что экспериментальным исследованиям элементов из легкого бетона при местном сжатии было уделено значительно меньшее внимание, чем исследованиям элементов из тяжелого трехкомпонентного бетона. Так, например, выборка экспериментальных данных по сопротивлению элементов из тяжелого трехкомпонентного бетона концентричному сжатию составляет более 900 образцов [3]. В то же время выборка доступных экспериментальных данных по сопротивлению элементов из легкого бетона (неармированных) концентричному местному сжатию составляет менее 100 образцов [3].

В то же время, из анализа выбранных для сопоставления нормативных документов, представленных в статье [3], следует, что в них, в большинстве своем, используются эмпирические зависимости, лишённые физического смысла и, как следствие этого, в процессе расчета прочности, имеет место занижение прочности бетона при местном сжатии на 30 и более процентов, либо неприемлемо большие значения коэффициента вариации.

**Бондарь В.В., магистр технических наук, ассистент кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Белорусского национального технического университета.**

**Рак Н.А., к.т.н., доцент, профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» Белорусского национального технического университета.**

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

В отечественных нормах [1] расчет сопротивления местному сжатию элементов из тяжелого бетона выполняется по зависимости, отражающей по своей структуре четкий физический смысл, заключающийся в повышении прочности бетона за счет появления бокового давления бетона, расположенного по периметру нагруженного сечения. Как показали расчеты, изложенные в статье [3], использование зависимости, применяемой в нормах [1], дает вполне удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных значений. Вместе с тем анализ приведенных экспериментальных данных свидетельствует об их существенной изменчивости.

Относительно легобетонных элементов с применением косвенного армирования, необходимо отметить, что практически все исследования и существующая техническая литература, касающиеся расчетов элементов с применением косвенного армирования, действующий в Республике Беларусь технический нормативный правовой акт по расчету бетонных и железобетонных конструкций СНБ 5.03.01-02 [1], посвящены конструкциям из тяжелых бетонов со средней плотностью от 2000 до 2800 кг/м<sup>3</sup>. При этом если до настоящего времени проектирование неармированных конструкций из легкого бетона выполнялось по нормам бывшего СССР [2], то для элементов конструкций из легкого бетона с косвенным армированием на данный момент не существует ни одного нормативного документа, регламентирующего бы их расчет.

Анализ содержания доступных источников, в том числе нормативных документов, по расчету и проектированию железобетонных конструкций показал, что во всех из них рассмотрен расчет несущей способности при местном сжатии косвенно армированных элементов из тяжелого бетона. Только в работе [4] предложена расчетная зависимость для оценки несущей способности зоны анкеровки напрягаемой арматуры балок из легкого бетона, косвенно усиленной хомутами.

С учетом выше сказанного, для разработки более обоснованной методики расчета сопротивления неармированных элементов из легкого бетона, а также легобетонных элементов, усиленных косвенным армированием, местному концентричному сжатию, была поставлена задача выполнить специальные исследования элементов из легкого бетона, изготовленного из имеющихся в Республике Беларусь исходных материалов, при местном сжатии с варьированием не только характера приложения нагрузки и прочностных характеристик бетона, но и его средней плотности в возможном диапазоне ее изменения.

#### Методика проведения экспериментальных исследований.

Для достижения поставленной цели, а именно создания научно обоснованной методики расчета сопротивления элементов из легкого бетона (неармированных и с применением косвенного армирования), плотностью от 1000 до 2000 кг/м<sup>3</sup>, местному сжатию, были выполнены экспериментальные исследования, основные задачи которых заключались в следующем:

- исследовать влияние на прочность легкого бетона при местном сжатии масштабного фактора при различных соотношениях размеров загружаемой плоскости элемента к площади приложения нагрузки;
- исследовать влияние на прочность легкого бетона при местном сжатии соотношения размеров загружаемой плоскости элемента к площади приложения нагрузки.
- исследовать влияние на сопротивление местному сжатию элементов из легкого бетона, армированных поперечными сетками, величины коэффициента косвенного армирования;
- исследовать эффективность применения косвенного армирования в элементах из легкого бетона относительно неармированных легобетонных элементов в условиях концентричного местного сжатия.

С учетом перечисленных выше задач было выполнено планирование эксперимента, разработаны конструкции опытных образцов, выполнено их изготовление в условиях заводского производства с использованием имеющихся в Республике Беларусь исходных материалов.

Для решения первой задачи предназначена первая серия опытных образцов в количестве 72 шт. В качестве образцов приняты кубы трех размеров.

Для решения второй из перечисленных задач предназначена вторая серия образцов опытных образцов в количестве 72 шт. В качестве образцов приняты призмы трех размеров с отношением их высоты к размеру поперечного сечения равным 2.

Более подробные сведения об опытных образцах двух данных серий содержатся в статье [3].

Для решения двух последних задач, в качестве опытных образцов были приняты призмы с отношением их высоты к размеру поперечного сечения равным 2 (3-я серия), армированные поперечными сетками С-1 или С-2 (объемный процент армирования  $\rho_{xy}$  соответственно равен 1,88% и 3,35%). Общее количество образцов-призм с косвенным армированием - 36 штук. Основные сведения об опытных армированных образцах приведены в статье [5].

Общий вид испытательной установки, вид испытательной установки непосредственно перед началом эксперимента, схема армирования образцов приведены на рисунках 1 и 2.

Образцы изготавливались в деревянной опалубке в заводских условиях на ОАО «Минскжелезобетон» из бетонной смеси, состав которой был предварительно подобран отделом технологии бетона и растворов РУП «Институт БелНИИС». В качестве легкого заполнителя использовался керамзитовый гравий фракции 4/10 производства ОАО «Завод керамзитового гравия г. Новолукмль». В качестве мелкого заполнителя использовался кварцевый песок. Изготовление образцов производилось посерийно из замесов легкого бетона одинакового состава. Для контроля физико-механических характеристик бетона были изготовлены контрольные образцы кубы (по 3 на каждый замес) размером 100x100x100 мм.

Испытания опытных образцов производились в лаборатории кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» БНТУ на прессе мощностью 5000 кН при рабочем диапазоне до 2000 кН. Нагрузка на образцы прикладывалась через штампы различных размеров.

Методика испытаний образцов-призм достаточно подробно описана в статьях [3, 5], поэтому дополнительно останавливаться на этом не имеет смысла.

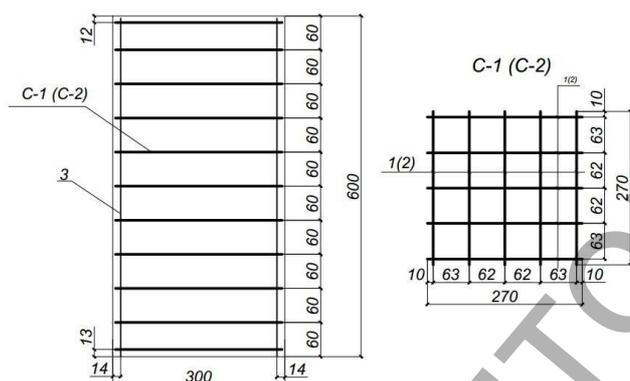


а)



б) **Рис. 1.** Общий вид испытательной установки (а), вид образца-призмы размерами 150×150×300 мм непосредственно перед началом нагружения через штамп сечением 60×60 мм (б)

Призма П300Ар1  
(П300Ар2)



**Рис. 2.** Схема армирования образцов-призм размерами 300×300×600 мм, сетки С-1, С-2 со стержнями 6 и 8 мм соответственно

**Анализ результатов экспериментальных исследований.** Разрушение всех неармированных образцов-призм происходило с образованием в области под штампом так называемого клина, имеющего вид перевернутой пирамиды, и сопровождалось раскалыванием бетона образца по вертикальным плоскостям с последующим сдвигом клина по одной из его боковых граней.

Разрушение всех армированных образцов также происходило с образованием в области под штампом так называемого клина, имеющего вид перевернутой пирамиды, но не сопровождалось раскалыванием образцов по вертикальным плоскостям с последующим сдвигом клина по одной из их боковых граней, как это было характерно для всех без исключения образцов-призм без использования косвенного армирования. Разрушение сопровождалось отслаиванием наружного слоя бетона, расположенного вне ядра, заключенного внутри области, образованной сетками косвенного армирования. Также активно образовывались трещины на верхней поверхности образца, на которую осуществлялось непосредственное воздействие через металлический штамп. Причиной этого являлось чаще всего выпучивание арматурных стержней верхней сетки, на которые воздействовал штамп, используемый в эксперименте. Необходимо отметить, что отслаивание бетона по боковым граням происходило преимущественно в верхней половине образца, т.е. на длине около 300 мм.

Характер образования трещин и разрушения образцов представлены на рисунке 3.

Анализ основных результатов испытаний первой серии образцов свидетельствует о достаточной стабильности полученных на образцах-близнецах величин разрушающей нагрузки в пределах каждой из групп образцов. Только в 6 образцах из 72 отклонение частных значений от средней по группе величины разрушающей нагрузки превышало 15 %, что для испытаний на местное сжатие можно считать вполне удовлетворительным.

Анализ основных результатов испытаний второй серии образцов также свидетельствует о достаточной стабильности полученных на образцах-близнецах величин разрушающей нагрузки в пределах каждой из групп образцов. Только в 8 образцах из 72 отклонение частных значений от средней по группе величины разрушающей нагрузки превышало 15 %, что для испытаний на местное сжатие можно считать вполне удовлетворительным. Все эти опытные образцы (и первой и второй серий) характеризуются большими размерами штампов (90 и 120 мм), где сложно осуществить точную центровку. Эти образцы были исключены из дальнейшего анализа, а средние значения определены по 2 оставшимся образцам группы.



а)



б)

**Рис. 3.** Характер образования трещин и разрушение образцов-призм: неармированных (а), усиленных косвенным армированием (б)

Затем по средним значениям напряжений  $\sigma_u$  для каждой группы неармированных образцов (первых двух серий) были определены значения коэффициента  $\omega_{obs}$  повышения прочности бетона при местном приложении нагрузки по формуле:

$$\omega_{obs} = \frac{\sigma_u}{f_{lc}}, \quad (1)$$

где  $f_{lc}$  – прочность на сжатие цилиндров размерами 150x300 мм, определенная по значениям прочности контрольных кубов размерами 100x100x100 мм, усредненным для образцов с близкой плотностью. При этом использовались следующие значения переходных коэффициентов: 0,95 для перехода от прочности кубов 100x100x100 мм к прочности кубов 150x150x150 мм; 0,9 для перехода от прочности кубов 150x150x150 мм к прочности цилиндра размерами 150x300 мм.

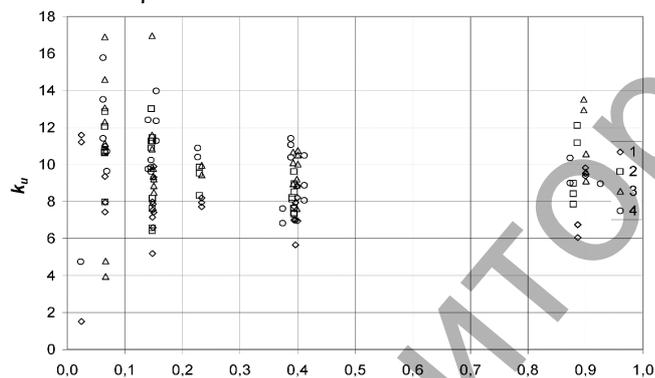
Анализ полученных значений  $\omega_{obs}$  для неармированных образцов-кубов и призм показал, что независимо от размера образца и средней плотности бетона характер их изменения одинаков – с увеличением значения  $R$  происходит увеличение значений  $\omega_{obs}$ .

По результатам исследований определены опытные значения коэффициентов эффективности бокового обжатия по зависимости

$$k_u = \frac{\omega_{obs} - 1}{\psi}, \quad (2)$$

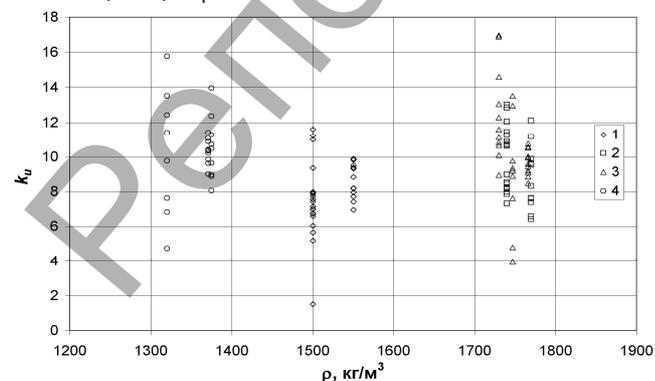
где  $\psi = \frac{f_{lct}}{f_{lc}} \cdot \left( \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} - 1 \right)$ . (3)

На рисунках 4 и 5 представлены значения коэффициента эффективности бокового обжатия  $k_u$  в зависимости от изменения коэффициента относительного бокового обжатия  $\psi$  и средней плотности бетона  $\rho$ .



1 – кубы ( $\rho = 1500...1550 \text{ кг/м}^3$ ); 2 – кубы ( $\rho = 1740...1770 \text{ кг/м}^3$ ); 3 – призмы ( $\rho = 1730...1770 \text{ кг/м}^3$ ); 4 – призмы ( $\rho = 1320...1375 \text{ кг/м}^3$ )

Рис. 4. Изменение опытных значений  $k_u$  при различных значениях параметра  $\psi$



1 – кубы ( $\rho = 1500...1550 \text{ кг/м}^3$ ); 2 – кубы ( $\rho = 1740...1770 \text{ кг/м}^3$ ); 3 – призмы ( $\rho = 1730...1770 \text{ кг/м}^3$ ); 4 – призмы ( $\rho = 1320...1375 \text{ кг/м}^3$ )

Рис. 5. Изменение опытных значений  $k_u$  при различных средних плотностях бетона  $\rho$

Как следует из рисунков 4 и 5, не прослеживается функциональной связи между значениями коэффициента эффективности бокового обжатия  $k_u$  и значениями параметров  $\psi$  и  $\rho$ . Это позволяет сделать вывод о том, что значение коэффициента эффективности бокового обжатия  $k_u$  может быть принято постоянным. По результатам вычислений это значение в среднем по всем образцам составило 9,5.

Анализ результатов испытаний армированных образцов-призм свидетельствует о достаточной стабильности полученных на образцах-близнецах величин разрушающей нагрузки в пределах каждой из групп образцов. Для всех 36 образцов отклонение частных значений от средней по группе величины разрушающей нагрузки не превысило 14%. Для испытаний на местное сжатие такой результат можно считать вполне удовлетворительным.

Для решения четвертой из поставленных задач, результаты проведенных испытаний образцов-призм с косвенным армированием были сопоставлены с результатами экспериментальных исследований 24 неармированных образцов-призм [6] размером 300x300x600 мм. Предварительно были вычислены средние по группам значения разрушающие нагрузки  $N_u$  при соответствующих равных размерах металлических штампов и примерно одинаковой средней плотности бетона образцов-призм.

Затем по средним значениям разрушающие нагрузки определялись значения коэффициента  $\omega_u$  повышения прочности бетона при местном приложении нагрузки по формуле:

$$\omega_u = \frac{N_u}{A_{c0} f_{lc}}, \quad (4)$$

где  $A_{c0}$  – площадь приложения нагрузки (площадь штампа),  $f_{lc}$  – прочность на сжатие цилиндров размерами 150x300 мм, определенная по значениям прочности контрольных кубов размерами 100x100x100 мм, усредненным для образцов с близкой плотностью. При определении значений  $f_{lc}$  использовались следующие значения переходных коэффициентов: 0,95 для перехода от прочности кубов 100x100x100 мм к прочности кубов 150x150x150 мм; 0,9 для перехода от прочности кубов 150x150x150 мм к прочности цилиндра размерами 150x300 мм. С результатами вычислений можно подробно ознакомиться в статье [5].

По вычисленным данным, производилась оценка эффективности применения косвенного армирования в условиях концентричного местного сжатия путем сопоставления коэффициентов повышения прочности бетона при местном приложении нагрузки для армированных и неармированных призм. Результаты этого сопоставления приведены в статье [5].

По результату сопоставления, можно сделать вывод, что постановка поперечного армирования позволяет значительно увеличить несущую способность легковесных элементов при местном сжатии. Однако увеличение процента поперечного армирования более  $\rho_{xy} = 1,88\%$  не дает дополнительного прироста несущей способности. В целом увеличение несущей способности за счет постановки поперечного армирования достигает 40–80% по сравнению с несущей способностью неармированных образцов.

Полученный экспериментально характер возрастания несущей способности легковесных элементов при местном сжатии при увеличении процента поперечного армирования должен быть учтен при разработке методики расчета.

**Методика расчета несущей способности.** По полученным результатам испытаний была разработана методика расчета несущей способности при местном сжатии неармированных элементов из легкого бетона, а также элементов, имеющих косвенное армирование поперечными сварными сетками.

Предлагаемая методика расчета сопротивления местному сжатию неармированных элементов из легкого бетона базируется на методике [1, 7, 8], исходящей из того, что повышение прочности бетона при местном сжатии по сравнению с его прочностью при осевом обусловлено влиянием бокового давления, создаваемого окружающим область нагружения бетоном.

Согласно предлагаемой методике для расчета прочности легкого бетона при местном сжатии для элементов без применения косвенного армирования, следует использовать зависимости (5)–(6), представленные в статье [3].

При этом прочность легкого бетона при осевом растяжении, в соответствии с предложенной в [3] методикой расчета, должна определяться по формуле норм [9]:

$$f_{lct} = \left( 0,4 + \frac{0,6\rho}{2200} \right) \cdot f_{ct}, \quad (5)$$

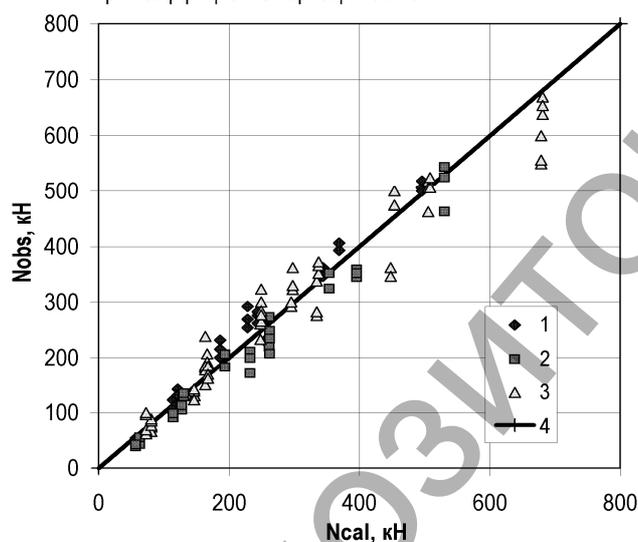
здесь  $\rho$  – средняя плотность легкого бетона ( $\text{кг/м}^3$ );  $f_{ct}$  – прочность бетона на осевое растяжение.

Данная зависимость была получена по результатам испытаний 130 образцов из легкого бетона (66 кубов и 64 призм) и применима при диапазоне изменения средней плотности бетона 1300...1800  $\text{кг/м}^3$  и диапазоне изменения параметра отношения  $\psi < 1$ .

Значение коэффициента эффективности  $K_U$  при этом следует принимать равным  $K_U = 9,5$ .

С использованием предложенной методики расчета по приведенным в статье [3] формулам, были выполнены вычисления расчетных значений разрушающих нагрузок для всех 130 опытных образцов. Среднее отношение опытных и расчетных значений составило 0,993 при коэффициенте вариации 0,144 (рисунок 6).

В то же время, выполненные по методике норм [9] расчеты дали среднее отношение опытных и расчетных значений 1.364 при коэффициенте вариации 0.226, а выполненные по методике норм бывшего СССР [2], дали среднее отношение опытных и расчетных значений 1.477 при коэффициенте вариации 0.245.



1 – при  $\rho = 1320...1375 \text{ кг/м}^3$ ; 2 – при  $\rho = 1500...1550 \text{ кг/м}^3$ ; 3 – при  $\rho = 1730...1770 \text{ кг/м}^3$ ; линия  $N_{obs} = N_{cal}$

**Рис. 6.** Сопоставление опытных значений с расчетными значениями по предложенной методике расчета

В основу методики расчета сопротивления элементов из легкого бетона, имеющих косвенное армирование в виде плоских сварных сеток, была положена методика расчета, разработанная ранее для элементов из тяжелого бетона [10].

С использованием аналитических зависимостей (6)–(10), представленных в статье [5], были выполнены расчеты несущей способности опытных образцов-призм из легкого бетона, армированным поперечными сварными сетками. Среднее отношение теоретических и экспериментальных значений составило 1.013 при коэффициенте вариации 0.102. Таким образом, указанные выше зависимости позволяют удовлетворительно оценить фактическую несущую способность косвенно армированных элементов из легкого бетона при местном сжатии.

Следует отметить, что в работе [11] зависимость (10) [5] была преобразована для практического проектирования с целью достижения 90%-ой обеспеченности в зависимости

$$\varphi_0 = \frac{5 + \psi_s}{1 + 4,5\psi_s}. \quad (6)$$

С использованием зависимостей (6)–(9) из статьи [5] и зависимости (6) были выполнены расчеты несущей способности опытных образцов-призм из легкого бетона, армированным поперечными сварными сетками. Среднее отношение теоретических и экспериментальных значений составило 0,977 при коэффициенте вариации 0,107. Таким образом, зависимости (6)–(9) [5] и (6), представленная выше, также позволяют удовлетворительно оценить фактическую несущую способность косвенно армированных элементов из легкого бетона при местном сжатии.

Однако следует отметить, что поскольку при оценке надежности расчета элементов по приложению D [12] нежелательно наличие в расчетных зависимостях эмпирических коэффициентов, определяемых с помощью базисных переменных, в статье [5] было предложено упрощение методики расчета прочности путем введения вместо переменного значения коэффициента эффективности косвенного армирования  $\varphi_0$ , постоянного его значения, равного  $\varphi_0 = 2,5$ .

При этом следует ограничивать прочность легкого бетона, армированного сетками, удвоенной его прочности при отсутствии сеток, как это было рекомендовано ранее для элементов из тяжелого бетона [13].

Тогда зависимость (6) из статьи [5] преобразуется к виду

$$f_{lct,eff} = f_{lct} + 2,5\rho_{xy} \cdot f_{yd,xy} \cdot \varphi_s \leq 2f_{lct}. \quad (7)$$

Следует отметить, что из неравенства

$$f_{lct,eff} = f_{lct} + 2,5\rho_{xy} \cdot f_{yd,xy} \cdot \varphi_s \leq 2f_{lct}$$

можно легко найти граничное значение коэффициента армирования  $\rho_{xy,lim}$ , при превышении которого дальнейшего повышение несущей способности не происходит.

Граничное значение этого коэффициента можно найти по формуле:

$$\rho_{xy,lim} = \frac{f_{lct}}{2,5f_{yd,xy}\varphi_s}. \quad (8)$$

Зависимость (8) устанавливает тот уровень поперечного армирования, превышение которого не будет давать дальнейшего повышения расчетной несущей способности, т.е. фактически устанавливает диапазон экономически обоснованной степени косвенного армирования.

По результатам проведенных экспериментов, с учетом описанной выше расчетной модели по приведенным выше зависимостям (7)–(8), были получены значения разрушающих нагрузок для 36 опытных образцов-призм (третья серия) с использованием косвенного армирования.

Оценка точности предлагаемого метода расчета [5] выполнялась согласно этапам 1–4 приложения D [12]. В результате вычислений получено значение поправки среднего значения  $b = 0,977$  и значение коэффициента вариации вектора ошибок  $V_b = 0,113$ . Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенный упрощенный метод расчета позволяет получить теоретические значения, удовлетворительно совпадающие с экспериментальными значениями.

### Заключение

1. На основании анализа существующих методов расчета элементов из легкого бетона плотностью от 1000 до 2000  $\text{кг/м}^3$  на местное сжатие и данных проведенных экспериментальных исследований установлено, что применяемые до настоящего времени в мире методы расчета сопротивления местному сжатию армированных и неармированных конструкций из этого вида бетона, являются ориентировочными и недостаточно обоснованы соответствующими экспериментальными данными.
2. Проведенные экспериментальные исследования работы неармированных и армированных элементов из легкого бетона в условиях концентричного местного сжатия при варьировании достаточно большого количества параметров, таких как геометрические раз-

- меры образцов, поперечные размеры металлических штампов, плотность образцов, коэффициент армирования образцов (для армированных образцов-призм), позволило установить ряд новых существенных закономерностей, изложенных ниже.
- Анализ проведенных исследований показал, что независимо от размера образца и средней плотности бетона, с увеличением площади загружаемой плоскости элемента к площади приложения нагрузки, происходит увеличение значения повышения прочности бетона при местном приложении нагрузки.
  - Результаты экспериментальных исследований элементов из легкого бетона при концентричном местном сжатии показали, что значение коэффициента эффективности бокового обжатия практически не зависит от средней плотности легкого бетона и уровня бокового обжатия. Это значение может быть принято постоянным и равным 9,5.
  - В элементах из легкого бетона, армированных плоскими поперечными сварными сетками, схема разрушения, а также развитие деформаций и напряжений от действия местной нагрузки, приложенной через штамп, отличается от таковых в неармированных элементах из легкого бетона. Схема разрушения, развитие деформаций в армированных образцах характеризуются, в отличие от неармированных образцов, отсутствием раскалывания образцов по вертикальным плоскостям. Разрушение сопровождалось отслаиванием наружного слоя бетона, расположенного вне ядра, заключенного внутри области, образованной сетками косвенного армирования. Также активно образовывались трещины на верхней поверхности образца, на которую осуществлялось непосредственное воздействие через металлический штамп. Причиной этого являлось чаще всего выпучивание арматурных стержней верхней сетки, на которые воздействовал штамп, используемый в эксперименте. Отслаивание бетона по боковым граням происходило преимущественно в верхней половине образца, т.е. на длине около 300 мм.
  - Постановка поперечного армирования позволяет значительно увеличить несущую способность легобетонных элементов при местном сжатии. Однако увеличение процента поперечного армирования более  $\rho_{xy} = 1,88\%$  не дает дополнительного прироста несущей способности. В целом увеличение несущей способности за счет постановки поперечного армирования достигает 40–80% по сравнению с несущей способностью неармированных образцов.
  - В развитие положений норм [1] предложена методика расчета сопротивления местному сжатию неармированных элементов из легкого бетона, которая обеспечивает хорошую сходимость расчетных и экспериментальных значений сопротивления элементов. По своей точности предложенная методика расчета значительно превышает точность методик расчета норм [2, 9] и может быть использована при дальнейшем совершенствовании отечественных ТНПА в области расчета бетонных и железобетонных конструкций.
  - Разработана методика расчета несущей способности при местном сжатии элементов из легкого бетона, имеющих косвенное армирование поперечными сварными сетками. Методика основана на учете нелинейной зависимости коэффициента эффективности косвенного армирования от его интенсивности. Предложенная методика позволяет удовлетворительно оценить фактическую несущую способность косвенно армированных элементов из легкого бетона при местном сжатии (среднее отношение теоретических и экспериментальных значений составило 1,013 при коэффициенте вариации 0,102).
  - Разработана упрощенная методика расчета несущей способности при постоянном значении коэффициента эффективности косвенного армирования  $\varphi_0 = 2,5$  при ограничении прочностью легкого бетона, армированного сетками, удвоенной его прочностью при отсутствии сеток. Упрощенная методика расчета позволяет получить теоретические значения, удовлетворительно совпадающие с экспериментальными значениями (значение поправки среднего значения  $b = 0,977$  и значение коэффициента вариации вектора ошибок  $V_0 = 0,113$ ). Данная методика расчета несущей способности при местном сжатии элементов из легкого бетона, имеющих косвенное армирование поперечными сварными сетками, может быть рекомендована для включения в нормативные документы по расчету таких элементов.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01–02. – Введ. 01.07.03. – Минск: Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2003. – 132 с.
- Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования: СНиП 2.03.01–84\*. – Введ. 20.08.84. – М: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 80 с.
- Рак, Н.А. Методика расчета прочности при местном сжатии элементов из легкого бетона / Н.А. Рак, В.В. Бондарь // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2011. – № 16 – С. 40–47.
- Axson, D. Ultimate Bearing Strength of Post-tensioned Local Anchorage Zones in Lightweight Concrete. – Thesis submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. – Blacksburg, 2008. – 104 p.
- Бондарь, В.В. Методика расчета несущей способности при местном сжатии элементов из легкого бетона, усиленных косвенным армированием / В.В. Бондарь, Н.А. Рак // Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2013. – № 1(79) – С. 172–176.
- Бондарь, В.В. Влияние масштабного фактора на прочность при местном сжатии элементов из легкого бетона / В.В. Бондарь, Н.А. Рак // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. тр. В 2 ч. Ч.1. Бетонные и железобетонные конструкции / Редкол.: М.Ф. Марковский (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Минсктиппроект, 2009. – С. 139–146.
- Concrete structures. Design and detailing rules: NS 3473:1994. – 1994. – 136 p.
- Leichtbeton und Stahlleichtbeton mit geschlossenem. Gefüge; Bemessung und Ausführung: DIN 4219-2:1979 – 1979.
- Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. GEN: EN 1992-1-1:2004. – Brussels, 2004. – 225 p.
- Петрова, К.В. Прочность керамзитобетонных призм, армированных поперечными сетками / К.В. Петрова, М.А. Юлдашев // Новое в технологии легких бетонов на пористых заполнителях. – М.: НИИЖБ, 1975. – С. 97–104.
- Филиппов, Б.П. Прочность и деформативность внецентренно-сжатых колонн с косвенным армированием / Б.П. Филиппов, Н.Г. Матков // Конструкции и узлы многоэтажных зданий из железобетона. – М.: Стройиздат, 1974. – С. 64–86.
- Еврокод. Основы проектирования несущих конструкций: ТКП EN 1990-2011 – 64 с.
- Рак, Н.А. Оценка надежности расчета несущей способности при местном сжатии элементов, усиленных косвенным армированием / Н.А. Рак // Строительная наука и техника. – 2012. – № 2(41). – С. 49–53.

Материал поступил в редакцию 30.03.15

#### RAK N.A., BONDAR V.V. Researches of resistance to concentric local compression of elements from light concrete

Analysis of the experimental investigation results of partially loaded lightweight concrete elements, including reinforced with lateral grids, are made. The basic provisions of design procedures of bearing capacity of these elements are presented.