

**РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
РАБОТЫ КОМБИНИРОВАННОГО СТЫКА СТЕНОВЫХ ПАНЕЛЕЙ  
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СЖИМАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ**

**Костюк А.И.**, к.т.н., профессор,  
**Ковтуненко Д.О.**, ассистент,  
**Ковтуненко А.В.**, к.т.н., доцент,  
*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*  
kovtunenکو.d.o@gmail.com

**Аннотация.** Статья посвящена изучению характера разрушения комбинированных горизонтальных стыков стеновых панелей из пенобетона неавтоклавного твердения и влияния некоторых факторов на несущую способность стыков. В качестве метода изучения принято экспериментальное исследование бетонных и железобетонных образцов стыков стеновых панелей. В результате испытаний выявлены характерные схемы разрушения для комбинированных стыков стеновых панелей с косвенным армированием и без него. В статье приведена таблица сравнения расчетных значений несущей способности комбинированных стыков по существующим методикам расчета и полученных в результате расчета при помощи ПК «ЛИРА» с полученными экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** пенобетон неавтоклавного твердения, стеновые панели, комбинированный стык, несущая способность, косвенное армирование, эксцентриситет.

**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ  
РОБОТИ КОМБІНОВАНОГО СТИКУ СТІНОВИХ ПАНЕЛЕЙ  
ПІД ВПЛИВОМ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТИСКАЮЧОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

**Костюк А.И.**, к.т.н., профессор,  
**Ковтуненко Д.О.**, ассистент,  
**Ковтуненко О.В.**, к.т.н., доцент,  
*Одеська державна академія будівництва та архітектури*  
kovtunenکو.d.o@gmail.com

**Анотація.** Стаття присвячена вивченню характеру руйнування комбінованих горизонтальних стиків стінових панелей з пінобетону неавтоклавного твердіння та впливу деяких факторів на несучу здатність стиків. В якості методу вивчення прийнято експериментальне дослідження бетонних та залізобетонних зразків стиків стінових панелей. В результаті випробувань виявлені характерні схеми руйнування для комбінованих стиків стінових панелей з непрямим армуванням та без нього. В статті приведена таблиця порівняння розрахункових значень несучої здатності комбінованих стиків за існуючими методами розрахунків та отриманих в результаті розрахунку за допомогою ПК «ЛІРА» з отриманими експериментальними даними.

**Ключові слова:** пінобетон неавтоклавного твердіння, стінові панелі, комбінований стик, несуча здатність, непряме армування, эксцентриситет.

**RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE WALL PANELS COMBINED  
JOINTS UNDER THE IMPACT OF VERTICAL COMPRESSION LOAD**

**Kostuk A.I.**, PhD, Professor,  
**Kovtunenکو D.O.**,

**Abstract.** The article describes an experiment devoted to the research of the work of the wall panels' joints under the action of a vertical compression load. A joint, consisting of three elements: the lower and upper wall panels made of normally cured foam concrete and the slab of reinforced heavy concrete of natural hardening was adopted when planning the experiment. Cases where the load is transferred to a structure with eccentricity, as well as the cases with indirect reinforcement of the support zones of the panels were considered during the experiment. The results of the experiment in the form of graphs of the bearing capacity dependence on the studied factors are described. In addition, the schemes of combined joints destruction were obtained by the results of the experiment. Simultaneously with the experiment, the load-carrying capacity was calculated by the finite element method (PC LIRA 9.4). The article is supplied with a table that represents the results of determining the bearing capacity by the experimental research, by the finite element method as well as existing analytical methods. The analysis of the graphs of load-bearing capacity in comparison with studied factors shows that the load-bearing capacity of the structure decreases with increasing eccentricity of the applied load. The effectiveness of indirect reinforcement of the support zones of the wall panels is manifested only if it is evenly spaced on a height of not more than  $\frac{1}{4}$  of the width of the wall panel.

**Keywords:** normally cured foam concrete, wallboards, combined joint, bearing capacity, indirect reinforcement, eccentricity.

**Введение.** В современном строительстве важное место наряду с тяжелым бетоном занимает ячеистый бетон. Его физические и теплотехнические свойства наилучшим образом используются в жилищном строительстве. В основном этот материал представлен в виде штучных блоков для кладочных работ, что обуславливает большую длительность возведения зданий в связи с необходимостью проведения дополнительных работ. Использование стеновых панелей позволит сократить время строительства.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Существующие методики расчета горизонтальных стыков стеновых панелей из ячеистых бетонов [3, с. 46, формула 1] носят эмпирический характер и не до конца отражают физическую сторону работы опорных зон стеновых панелей.

В настоящее время изучением напряженно-деформированного состояния стыковых соединений крупнопанельных зданий занимается лаборатория Железобетонных и каменных конструкций Казанского государственного архитектурно-строительного университета. Авторами работ [0, с. 39, формула 5; 0, с. 33, формула 2.1; 0] разработана методика расчета стыков по прочности, которая базируется на теории сопротивления анизотропных материалов сжатию и отражает механизм разрушения опорных зон стеновых панелей из тяжелого бетона. Применимость данной теории для определения несущей способности горизонтальных стыков стеновых панелей из ячеистых бетонов не изучена.

В Одесской государственной академии строительства и архитектуры проводятся исследования работы стыков стеновых панелей выполненных из пенобетона неавтоклавного твердения. В работе [0] приведена методика численного исследования напряженного состояния стыков, реализованная в ПК «ЛИРА».

**Целью** экспериментальных исследований было изучение характера разрушения комбинированных горизонтальных стыков стеновых панелей из пенобетона неавтоклавного твердения и влияния различных факторов на несущую способность стыков.

**Планирование экспериментальных исследований.** При анализе факторов, способных влиять на несущую способность стыка, были выделены два наиболее значимых: эксцентриситет приложения нагрузки и количество сеток косвенного армирования. Кодированные и натурные значения факторов приведены в таблице 1. Схема испытаний приведена на рис. 1, а.

Для проведения эксперимента были изготовлены образцы, состоящие из трех частей: вышележащая панель, нижележащая панель и плита перекрытия. Размеры элементов опытных образцов приняты по геометрическому подобию к натурным параметрам панелей и их стыков. Толщина стеновых панелей принята 200 мм (100 мм контактная часть и 100 мм платформенная часть). Толщина плиты перекрытия принята 150 мм. Ширина опытных образцов принята, с учетом размеров опорной площадки прессы, 600 мм. Площадки опирания в контактной и платформенной частях образца верхней стеновой панели расположены близко друг к другу, поэтому можно считать, что нагрузка на образец приложена на всю его ширину  $l_k=200$  мм. Высота верхней панели образца принята  $3l_k = 600$  мм. Максимально возможная ширина опирания в платформенной части нижней панели составляет 100 мм. Требуемая высота нижней панели составляет  $3l_k = 300$  мм. Высота выступа нижней панели принята 160 мм. Окончательно высота нижней панели вместе с выступом принята 600 мм, исходя из условий изготовления. Вылет фрагмента плиты составляет 510 мм.

Таблица 1 – Характеристики экспериментальных образцов

Шифр образца	Значения варьируемых факторов			
	Количество сеток косвенного армирования $X_1$		Эксцентриситет приложения нагрузки $X_2$	
	кодированные	натурные $n$ , шт.	кодированные	натурные $e$ , мм
СКП-0-0	- 1	0	- 1	0
СКП-2-0	0	2	- 1	0
СКП-4-0	+ 1	4	- 1	0
СКП-0-20	- 1	0	0	20
СКП-2-20(1)	0	2	0	20
СКП-2-20(2)	0	2	0	20
СКП-2-20(3)	0	2	0	20
СКП-4-20	+ 1	4	0	20
СКП-0-40	- 1	0	+ 1	40
СКП-2-40	0	2	+ 1	40
СКП-4-40	+ 1	4	+ 1	40

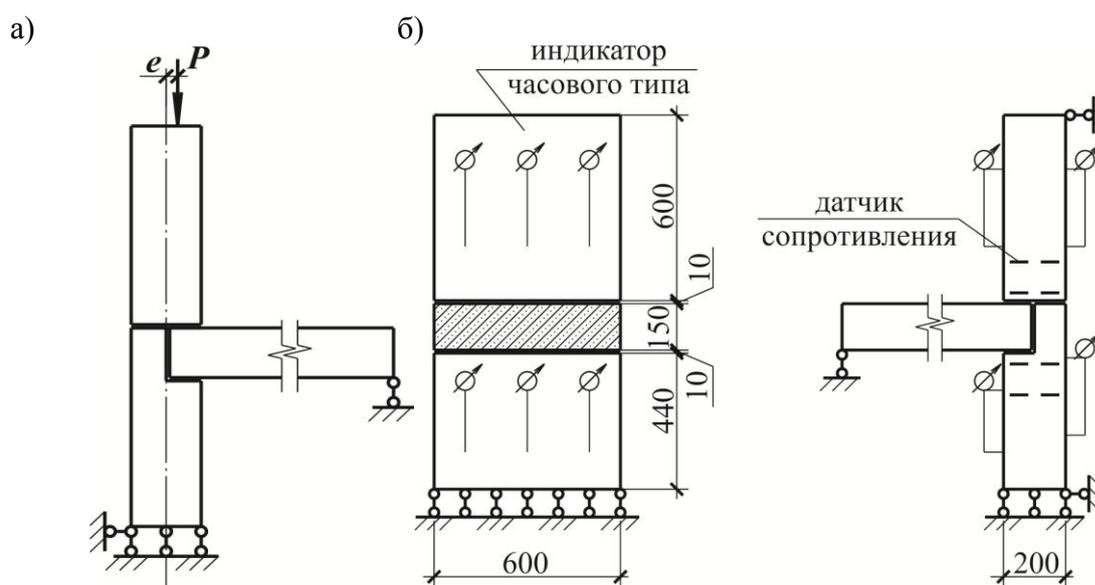


Рис. 1. Схема испытаний (а) и модель испытываемого элемента со схемой расположения измерительных приборов (б)

Стеновые панели опытных образцов выполнены из пенобетона неавтоклавного твердения плотностью от 700 до 1000 кг/м<sup>3</sup>. Плита перекрытия выполнена из тяжелого бетона класса С20/25. Косвенное армирование стеновых панелей выполнено сетками из арматурной проволоки Ø3 мм класса Вр-І с условным пределом текучести  $f_y = 608$  МПа и модулем упругости  $E = 20,51 \times 10^5$  МПа, полученными по результатам испытаний.

На рис. 1, б представлена модель испытываемого элемента с указанием основных размеров и со схемой расположения измерительных приборов. Датчики сопротивления установлены на уровне первой и четвертой сеток косвенного армирования.

Все образцы подвергались действию статической нагрузки. Нагрузка на образец комбинированного стыка на каждом этапе прикладывалась по 0,1 от величины предполагаемой разрушающей.

**Основные результаты экспериментальных исследований.** По результатам испытаний горизонтальных стыков стеновых панелей из неавтоклавного пенобетона получены относительные продольные и поперечные деформации (таблицы 2, 3), а также выявлены характерные схемы разрушения, приведенные на рис. 2.

Разрушение опытных образцов без косвенного армирования происходило в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, а. Образование первой вертикальной трещины наблюдалось возле растворного шва на границе между контактной и платформенной частью стеновых панелей. При увеличении нагрузки происходило развитие вертикальной трещины по высоте стеновых панелей. Разрушение образца происходило в результате раскола панелей по условной границе между контактной и платформенной частями.

Разрушение опытных образцов с косвенным армированием происходило в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, б. Характер трещинообразования на видимых поверхностях образцов с косвенным армированием в целом соответствует трещинообразованию образцов без косвенного армирования. В то же время, наличие сеток препятствовало развитию сквозных вертикальных трещин. Разрушение образцов происходило от смятия пенобетона стеновых панелей в местах опирания на плиту перекрытия из тяжелого железобетона и опорную площадку пресса. В образцах, нагрузка к которым прикладывалась с эксцентриситетом, происходил откол выступающей контактной части нижней стеновой панели.

Таблица 2 – Значения относительных продольных деформаций внутренней грани верхней стеновой панели

Уровень нагрузки $P$ , кН	Относительные деформации $\epsilon \times 10^4$										
	СКП-0-0 $f_{\epsilon, cube} = 2,39$ МПа	СКП-2-0 $f_{\epsilon, cube} = 0,89$ МПа	СКП-4-0 $f_{\epsilon, cube} = 1,99$ МПа	СКП-0-20 $f_{\epsilon, cube} = 1,42$ МПа	СКП-2-20(1) $f_{\epsilon, cube} = 2,95$ МПа	СКП-2-20(2) $f_{\epsilon, cube} = 2,84$ МПа	СКП-2-20(3) $f_{\epsilon, cube} = 4,16$ МПа	СКП-2-40 $f_{\epsilon, cube} = 1,66$ МПа	СКП-0-40 $f_{\epsilon, cube} = 2,14$ МПа	СКП-4-20 $f_{\epsilon, cube} = 3,26$ МПа	СКП-4-40 $f_{\epsilon, cube} = 4,61$ МПа
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,67	1,60	1,20	0,80	2,00	1,20	1,60		2,80	1,60	0,80	0,40
13,3	2,80	2,80	2,00	4,80	2,80	3,20	1,20	5,60	3,60	3,20	0,80
20,0	3,60	4,40	2,80	9,20	4,00	5,20	2,40	10,8	8,80	4,80	1,60
26,7	5,20	6,40	4,40	13,2	5,60	6,80	2,80	15,2	11,6	7,20	2,40
33,3	6,40	10,8	6,00	6,40	7,20	10,0	3,60	16,8	17,2	8,80	3,20
40,0	7,60	-	7,60	-	8,80	13,2	4,80	21,6	-	12,8	4,00
46,7	8,80	-	9,20	-	10,4	-	5,60	26,0	-	19,2	4,80
53,3	10,0	-	-	-	12,4	-	-	35,2	-	-	5,60
60,0	17,2	-	-	-	14,8	-	-	-	-	-	6,40
66,7	-	-	-	-	17,2	-	-	-	-	-	7,60
73,3	-	-	-	-	20,4	-	-	-	-	-	8,80

Таблица 3 – Значения относительных поперечных деформаций внутренней грани верхней стеновой панели

Уровень нагрузки $P$ , кН	Относительные деформации $\varepsilon \times 10^4$										
	СКП-0-0 $f_{c,cube} = 2,39$ МПа	СКП-2-0 $f_{c,cube} = 0,89$ МПа	СКП-4-0 $f_{c,cube} = 1,99$ МПа	СКП-0-20 $f_{c,cube} = 1,42$ МПа	СКП-2-20(1) $f_{c,cube} = 2,95$ МПа	СКП-2-20(2) $f_{c,cube} = 2,84$ МПа	СКП-2-20(3) $f_{c,cube} = 4,16$ МПа	СКП-2-40 $f_{c,cube} = 1,66$ МПа	СКП-0-40 $f_{c,cube} = 2,14$ МПа	СКП-4-20 $f_{c,cube} = 3,26$ МПа	СКП-4-40 $f_{c,cube} = 4,61$ МПа
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6,67	-0,60	-0,20	-0,20	-0,30	-0,10	-0,30	0,00	-0,80	0,00	-0,30	-0,10
13,3	-0,80	-0,50	-0,50	-0,50	-0,20	-0,60	-0,30	-1,40	-1,40	-0,60	-0,30
20,0	-1,00	-0,9	-0,90	-	-0,30	-0,90	-0,40	-2,00	-	-0,90	-0,50
26,7	-1,20	-1,7	-3,70	-	-0,80	-1,00	-0,50	-2,40	-	-1,30	-0,70
33,3	-1,40	-	-4,10	-	-1,40	-1,80	-0,70	-3,00	-	-1,60	-0,80
40,0	-2,10	-	-6,30	-	-1,90	-16,4	-0,80	-3,00	-	-1,80	-1,00
46,7	-3,00	-	-	-	-2,30	-	-0,90	-3,80	-	-2,30	-1,10
53,3	-3,00	-	-	-	-2,70	-	-4,10	-	-	-	-1,30
60,0	-	-	-	-	-	-	-4,5	-	-	-	-1,4
66,7	-	-	-	-	-	-	-4,7	-	-	-	-1,7
73,3	-	-	-	-	-	-	-6,1	-	-	-	-

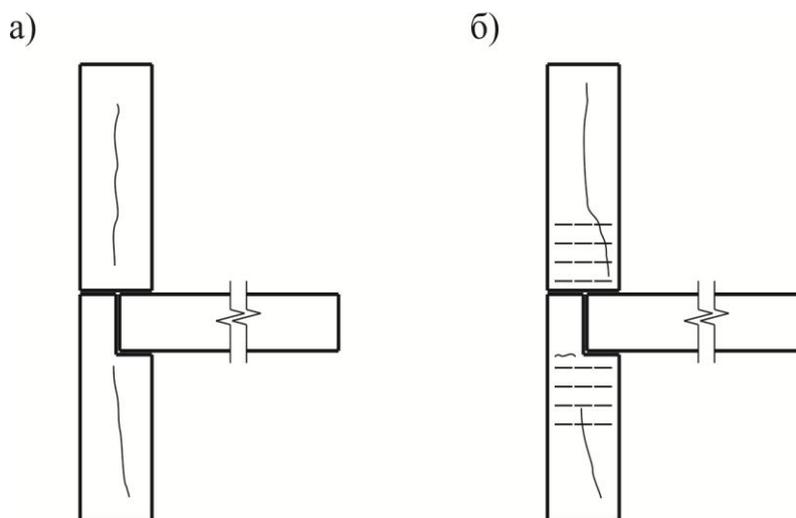


Рис. 2. Характерные схемы разрушения горизонтальных стыков стеновых панелей из пенобетона неавтоклавного твердения:  
 а – разрушение образцов без косвенного армирования;  
 б – разрушение образцов с косвенным армированием

Комбинированный стык также был смоделирован в программном комплексе ЛИРА 9.4 [1], в котором реализован метод конечных элементов.

При моделировании использованы конечные элементы, позволяющие построить плоскую модель:

1) 223 – физически нелинейный универсальный прямоугольный КЭ плоской задачи (балка-стенка), моделирующий тело пенобетона и растворного шва;

2) 210 – физически нелинейный универсальный пространственный стержневой КЭ, моделирующий косвенное армирование стыка.

Расчет был произведен в нелинейной постановке при ступенчатом приращении нагрузки. Расчетные физико-механические характеристики материалов задавались по результатам испытаний опытных образцов кубов и призм на сжатие, а также арматурных стержней на растяжение. В качестве критерия разрушения стыка принималось значительное приращение перемещений узлов расчетной схемы при текущей ступени нагружения.

В таблице 4 приведены значения кубиковой прочности пенобетона, а также значения несущей способности стыка, полученные в результате испытаний, расчетов по формулам, приведенным в нормативной литературе [0, с. 46, формула 1] и исследованиях, выполненных под руководством Б.С. Соколова [0, с. 39, формула 5; 0, с. 33, формула 2.1; 0], и численных исследований [0].

Таблица 4 – Сравнение несущей способности комбинированных горизонтальных стыков

Шифр образца	Кубиковая прочность $f_{cd,cube}$ , МПа	Несущая способность стыка, кН			
		по результатам испытаний	по [3]	по [5]	по результатам численных исследований [1]
СКП-0-0	2,39	60,00	141,3	380,9	53,33
СКП-2-0	0,89	33,33	66,3	-	20,00
СКП-4-0	1,99	46,67	192,0	-	53,33
СКП-0-20	1,42	33,33	78,7	147,0	26,67
СКП-2-20-1	2,95	73,33	198,1	-	66,67
СКП-2-20-2	2,84	46,67	130,3	-	40,00
СКП-2-20-3	4,16	86,67	372,3	-	80,00
СКП-4-20	3,26	46,67	163,6	-	53,33
СКП-0-40	2,14	33,33	93,9	427,4	46,67
СКП-2-40	1,66	53,33	89,3	-	40,00
СКП-4-40	4,61	73,33	216,9	-	80,00

Примечание: методика [5] не позволяет учитывать косвенное армирование опорных зон стеновых панелей

Графики зависимости несущей способности комбинированных горизонтальных стыков стеновых панелей из пенобетона неавтоклавного твердения от исследуемых факторов приведены на рис. 3 и 4.

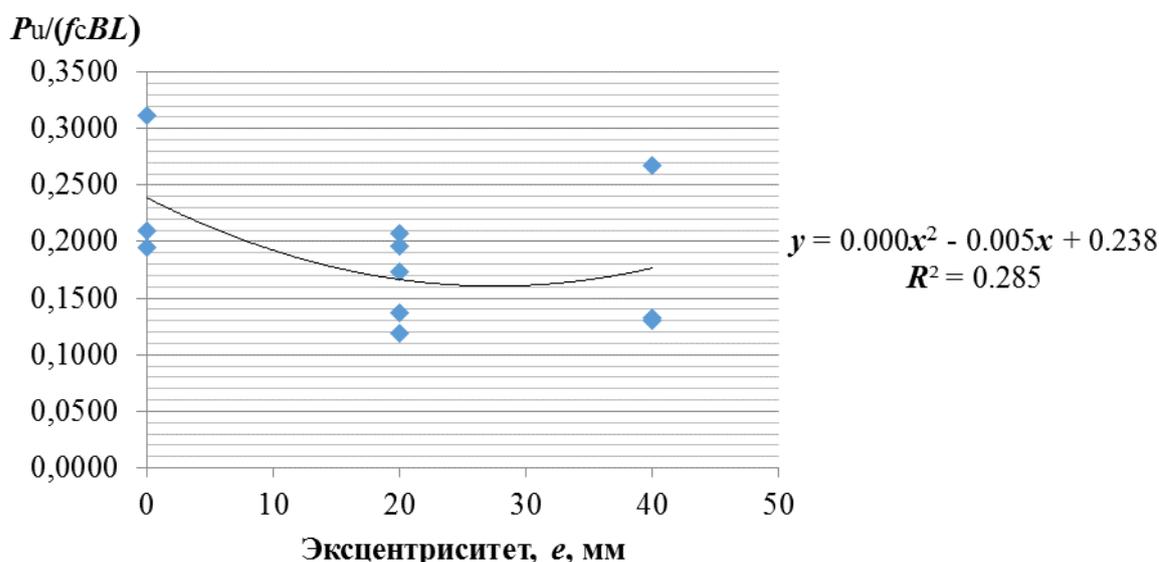


Рис. 3. Зависимость несущей способности от эксцентриситета приложения нагрузки

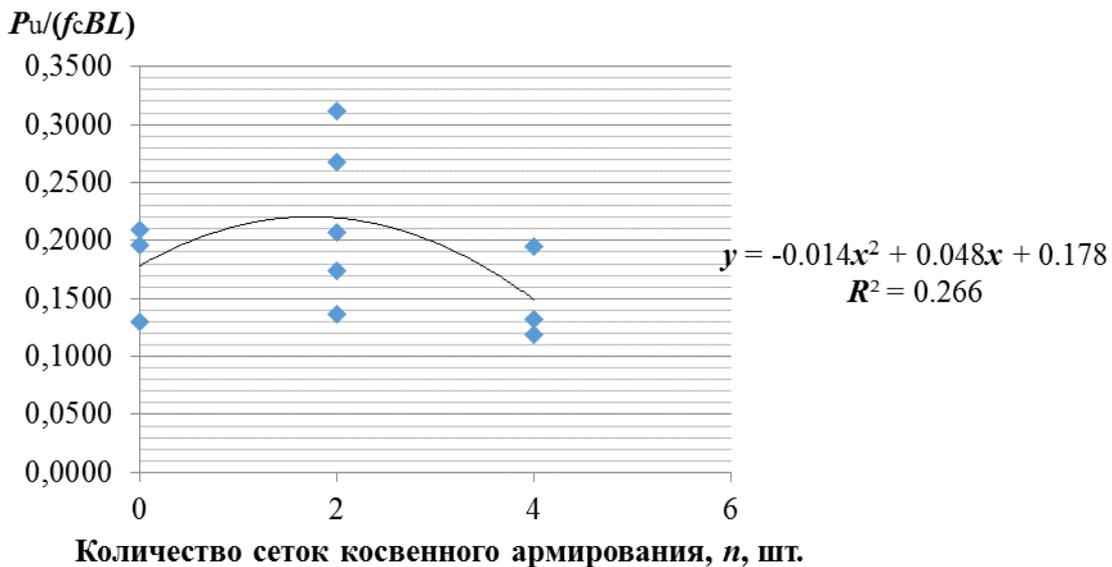


Рис. 4. Зависимость несущей способности от количества сеток косвенного армирования

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Анализируя полученные результаты эксперимента, можно заключить следующее:

- несущая способность горизонтальных стыков стеновых панелей из пенобетона неавтоклавного твердения, вычисленная согласно нормативной литературе [0, с. 46, формула 1] и предложениям авторов [0, с. 39, формула 5; 0, с. 33, формула 2.1; 0] значительно завышена по сравнению с результатами численных исследований и натурных экспериментов;
- при увеличении эксцентриситета приложения нагрузки происходит снижение несущей способности стыка;
- при косвенном армировании торцов стеновых панелей двумя сетками несущая способность стыка увеличивается; при косвенном армировании четырьмя сетками несущая способность стыка не изменяется.

В перспективе планируется расширение числа варьируемых факторов и рассмотрение горизонтального стыка стеновых панелей с двухсторонним опиранием плит перекрытий.

### Литература

1. Костюк А.И. Численный анализ работы комбинированного стыка из пенобетона неавтоклавного твердения / А.И. Костюк, Д.О. Зазуля // Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Киев: ГП НИИСК, 2011 – Вып.74. Книга 2. – С. 326-332.
2. Никитин Г.П. Прочность горизонтальных стыков бетонных конструкций зданий и сооружений: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Никитин Георгий Петрович. – Казань, 2007. – 173 с. – Библиогр.: с. 152-166.
3. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из ячеистых бетонов (к СНиП 2.03.01-84) – М.: Центр. ин-т типового проект, 1986. – 256 с.
4. Седов А.Н. Конструктивно-технологические особенности усиления комбинированных стыков в крупнопанельных зданиях при реконструкции: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Седов Артур Наилевич. – Казань: КазГАСУ, 2009. – 20 с.
5. Соколов Б.С. Новый подход к расчету прочности бетонных элементов при местном действии нагрузки / Б.С. Соколов // Бетон и железобетон. – М., 1992. – Вып. №10. – С. 22-25.

Стаття надійшла 4.01.2018