

## К АНАЛИЗУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СДВИГОВЫХ УСИЛИЙ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛКАХ-СТЕНКАХ

**Еньков Е.У.**, к.т.н., доцент  
**Попов А.В.**,

*Одесская государственная академия строительства и архитектуры*  
senkov73@gmail.com

**Аннотация.** Проведен анализ экспериментальных данных испытаний на срез балок-стенок при различной длине площадки опирания от равномерно распределенной нагрузки. Произведены компьютерные расчеты таких балок-стенок с целью определения поперечных сил в вертикальных сечениях в пределах длины площадки опирания. Сопоставлены результаты опытных и предлагаемых теоретических значений поперечной силы по внутренней грани пилона и посередине площадки опирания.

**Ключевые слова:** площадка опирания (ширина пилона), внутренняя грань пилона, поперечная сила.

## ДО АНАЛІЗУ РОЗПОДІЛУ ЗСУВНИХ ЗУСИЛЬ У ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛКАХ-СТІНКАХ

**Єньков Є.У.**, к.т.н., доцент,  
**Попов А.В.**,

*Одеська державна академія будівництва та архітектури*  
senkov73@gmail.com

**Анотація.** Було проведено аналіз експериментальних даних дослідів на зріз балок-стінок при різній довжині площадки спирання від рівномірно розподіленого навантаження. Зроблені комп'ютерні розрахунки таких балок-стінок з метою визначення поперечних сил у вертикальних перерізах в межах довжини площадки спирання. Порівняні результати дослідних та пропонованих теоретичних значень поперечної сили уздовж внутрішньої грані пілона та посередині площадки спирання.

**Ключові слова:** площадка спирання (ширина пілона), внутрішня грань пілона, поперечна сила.

## TO THE ANALYSIS OF DISTRIBUTION OF SHIFT EFFORTS IN REINFORCED CONCRETE BEAMS WALLS

**Enkov E.U.**, PhD, Assistant Professor,  
**Popov A.V.**,

*Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*  
senkov73@gmail.com

**Abstract.** The project of reinforced concrete beams are often manufactured using the concept of lateral force as the integral characteristic of shear stresses, without taking into account their distribution on the cross section height. The work is dedicated to the consideration of distribution of tangent tension in cross section height in beams walls of various height under different bearing conditions. Computer simulations on beams walls with 10 m span and of various height were conducted and shear forces diagram constructed in three vertical cross sections. The analysis of

experimental data of Polish researchers of the test on section beams walls with different length of the bearing platform from an evenly distributed load has been carried out. Computer simulations of such beams walls were performed to determine the shear forces in the vertical cross-sections within the bearing pad length. The results of experimental and the proposed theoretical values of the transverse force upon the inner edge and in the middle of the pylon with different bearing area length were compared.

**Keywords:** area of bearing (width of pylon), inner edge of a pylon, transverse force.

**Введение.** При проектировании обычных железобетонных балок, как правило, используют гипотезы Бернулли и Журавского, что дает формулы элементарной теории изгиба Навье:

$$\sigma_x = \frac{M}{I} y; \quad \tau = \frac{QS^*}{Ib^*}, \quad (1)$$

причем для прямоугольного сечения касательные напряжения распределены параболически по высоте:

$$\tau = \frac{6Q}{bh^3} \cdot \left( \frac{h^2}{4} - y^2 \right); \quad \tau_{\max} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q}{A}. \quad (2)$$

Равнодействующую касательных напряжений в сечении принято называть поперечной силой, в этом случае равной:

$$Q = \frac{2}{3} \tau_{\max} \cdot A,$$

где:  $A$  – площадь поперечного сечения;  $b$ ,  $h$  – соответственно ширина и высота сечения.

Формулы (1), (2) достаточно хорошо подтверждены многочисленными экспериментальными данными для обычных балок с различными реологическими характеристиками, даже с трещинами, при  $h / \ell \leq 0,2$ . Для более высоких балок при  $0,2 < h / \ell < 0,5$  рекомендации по определению касательных напряжений расплывчаты, а при  $h / \ell \geq 0,5$  (балки-стенки) зачастую противоречат друг другу. По-видимому, это связано с использованием интегральной характеристики касательных напряжений  $Q$  без анализа их распределения по высоте сечения.

**Цели и задачи.** В определенной мере такой анализ позволяют произвести методы теории упругости. Как известно, для линейно-упругой однородной изотропной плоской задачи основные уравнения в напряжениях с помощью функции напряжений Эри приводят к разрешающему бигармоническому уравнению плоской задачи теории упругости. В большинстве своем аналитические решения краевых задач теории упругости даже в частных случаях достаточно сложны, поэтому в инженерной практике более удобны численные методы, например, метод конечных разностей, как наиболее мобильный при внесении изменений в исходные данные. Конечно-разностный аналог бигармонического уравнения плоской задачи теории упругости приводит к системе алгебраических уравнений, каждое из которых содержит не более 13 ненулевых членов.

В свое время на кафедре строительной механики ОГАСА был реализован алгоритм расчета железобетонных балок-стенок, учитывающий длительное действие нагрузки по наследственной теории ползучести бетона И.Е. Прокоповича и трещинообразование по теории деформирования железобетона Н.И. Карпенко [1].

Разработанные на основе этого алгоритма программы "Диск-1" (для ЭВМ БЭСМ-4М) и "Диск-2" (для ЭВМ ЕС-1022) использовали шагово-итерационный процесс с дискретизацией по ступеням кратковременного нагружения, по времени, а также по узлам конечно-разностной сетки. Разрешающее интегро-дифференциальное уравнение [1] содержит все частные производные 4-го порядка от некоторых функций, зависящих от многих факторов. На каждом шаге по ступени нагружения и по времени решение сводится к системе дифференциальных уравнений в частных производных с переменными коэффициентами.

Дискретизация по координатам методом сеток сводит решение на каждой итерации к системе алгебраических уравнений последовательными приближениями. Конечно – разностный аналог при этом является 21-членным.

Оказалось, что для анализа распределения касательных напряжений по высоте балок-стенок можно без особого ущерба для точности пренебречь нелинейностью деформирования железобетона за счет трещинообразования и ползучести бетона.

**Объекты и методы исследования.** Упрощенный вариант компьютерной программы "Высокая балка" создан при помощи среды программирования MATLAB. Для балок-стенок единичной толщины при шарнирном опирании углов и действии равномерно распределенной по верхней грани нагрузки  $q = 100 \text{ кН/м}$  построены эпюры нормальных и касательных напряжений для трех сечений. Пролет балок-стенок принят  $\ell = 10 \text{ м}$ , отношение  $k = h / \ell = 0,1; 0,75; 1,5$  (соответственно высота 1м; 7,5м; 15м) при конечно-разностной сетке  $29 \times 29$  внутренних узлов.

На рис. 1, 2, 3 показаны эпюры напряжений  $\sigma_x$  и  $\tau_{xy}$  для балок-стенок разной высоты при прочих равных условиях: по оси ординат отложены номера рядов горизонтальных узлов, причем значению "ноль" соответствует верхний законтурный ряд узлов. На эпюрах напряжений: сплошной линией показаны эпюры в вертикальном сечении непосредственно вблизи шарнирной опоры в нижнем углу балки-стенки; точками – эпюры в четверти пролета; пунктирной линией – в сечении посередине балки.

С увеличением высоты балки нейтральная линия нормальных напряжений  $\sigma_x$  смещается в сторону нижней грани вблизи опор, а касательные напряжения экстремальны также в нижней зоне балок (что оправдывает введение термина "эффективная высота  $h_t$ " [2] при расчете железобетонных балок), и даже становятся знакопеременными, чего элементарная теория изгиба балок в принципе учесть не может.

Для вертикальных сечений балок-стенок были построены эпюры поперечных сил как равнодействующих  $\tau_{xy}$  в этих сечениях, из которых видно, что при увеличении высоты балки-стенки экстремальные значения  $Q$  приходятся не на опору, а несколько смещены внутрь пролета. При опирании не на шарнирные опоры, а по площадкам конечной длины (на консоли колонн или на пилоны),  $Q_{\max}$  соответствует сечению не по внутренней грани пилона, как считалось ранее. Это обстоятельство требует учета при расчете на срез балок-стенок, т.к. по такой схеме работают ригели широких рам, высокие перемычки, участки стен второго этажа в зданиях со встроенными помещениями на первом этаже, стенки бункеров и силосов.

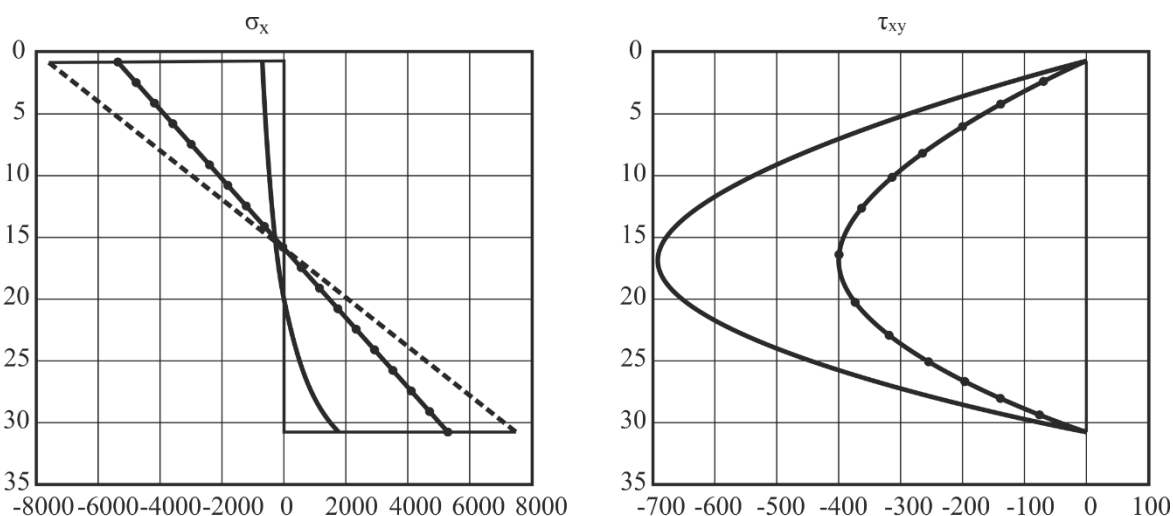


Рис. 1. Эпюры напряжений в сечениях при  $k = 0,1 \text{ (кН/м}^2\text{)}$

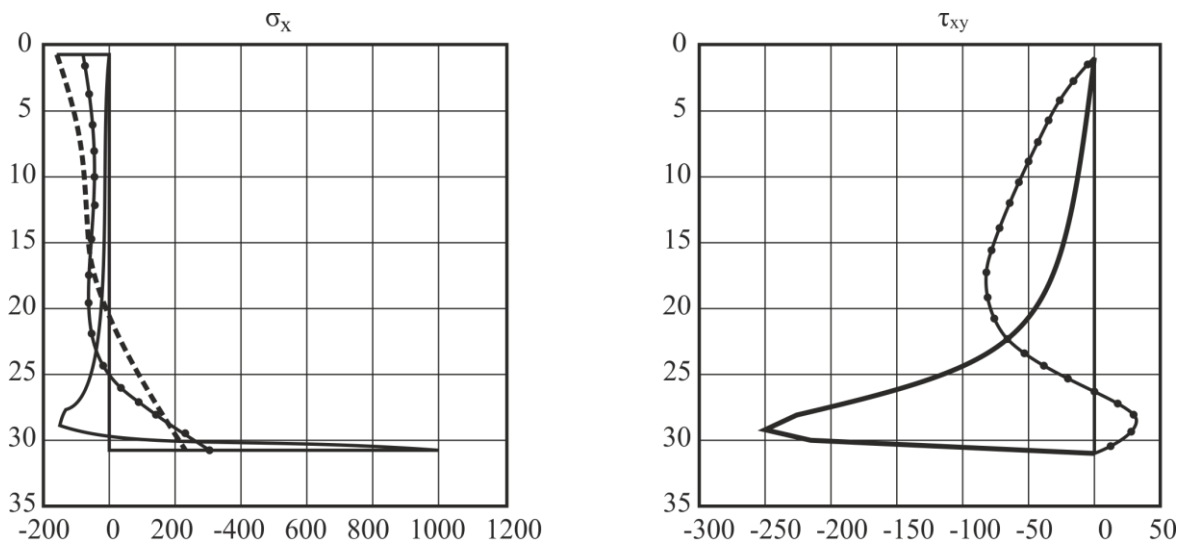


Рис. 2. Эпюры напряжений в сечениях при  $k = 0,75$  (кН/м<sup>2</sup>)

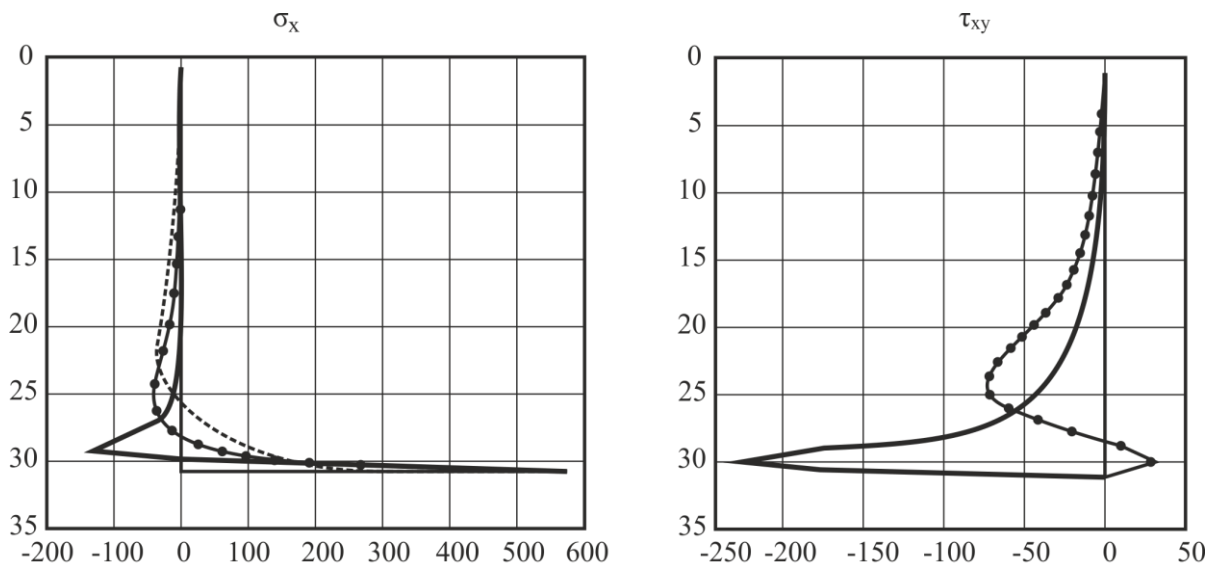


Рис. 3. Эпюры напряжений в сечениях при  $k = 1,5$  (кН/м<sup>2</sup>)

Испытания моделей железобетонных балок-стенок на срез шириной 150 см, высотой 200 см ( $h / \ell = 1,33$ ), и толщиной 10 см, были проведены польскими исследователями ([2], стр. 42-82). Варьировалось соотношение ширины пилона  $C_0$  и пролета между пилонами  $\ell_0$ , причем  $r = C_0 / \ell_0 = 0,25; 0,5; 1,0$  для балок-стенок серий соответственно А1, А2, А3 (по 3 балки в каждой серии), рис. 4.

**Результаты исследований.** Нагрузка от пресса передавалась через закрепленную на цилиндрических шарнирах траверсу и слой резины ступенями. Ожидаемое разрушение от среза было получено лишь в одном элементе серии А3. Остальные 8 образцов разрушились от смятия опор, тем не менее, приведенные в [2] опытные данные, несмотря на их ограниченность, позволяют в некоторой степени сопоставить с предлагаемой методикой.

Значения поперечной силы по внутренней грани пилона  $Q_{тр}^{on}$  интерполированы по приведенным в [2] опытным значениям величины сжатия на опорах  $N_{max}^{on}$  (среднее по 3-м образцам).

Сопоставление результатов приведено в табл. 1.

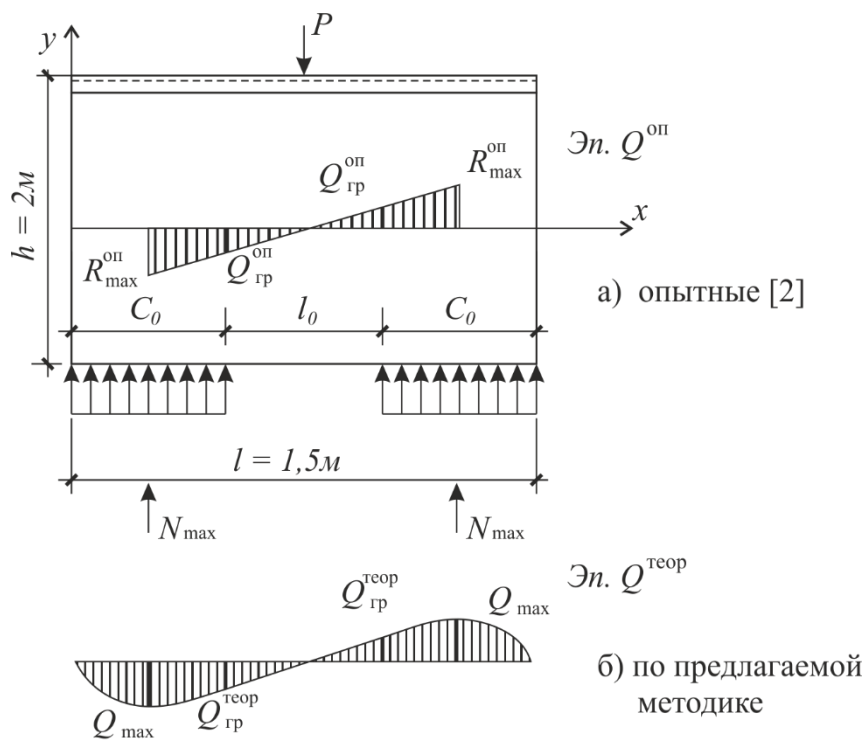


Рис. 4. Схема испытаний и усилий.

Таблица 1 – Сопоставление результатов

Серия №	$r = C_0 / l_0$	$l_0$ , (м)	$C_0$ , (м)	Опытные [2], (кН)			Теоретические, (кН)	
				$P_{разр.}$	$N_{max}$	$Q_{гр}$	$Q_{max}$	$Q_{гр}$
A1	0,25	1,0	0,25	1663	980	784	884	667
A2	0,5	0,75	0,375	2497	1260	840	1186	791
A3	1,0	0,5	0,5	3560	1910	955	1884	917

**Выводы.** Расхождения значений  $Q$  опытных и по предлагаемой методике может быть объяснено, во-первых, как недостаточной жесткостью траверсы, и, как следствие, неравномерностью передачи нагрузки, о чем упоминают авторы [2] а, во-вторых, чрезмерной концентрацией напряжений над пилонами (эффект "обоймы"). С увеличением ширины пилонов  $C_0$  опытные данные более удовлетворительно совпадают с теоретическими, что дает в какой-то мере право оценивать влияние  $Q$  при расчетах поперечного армирования обычных балок, и устанавливать аргументировано эффективную высоту  $h_e$ , в пределах которой проявляется плоское напряженное состояние, например в опорных зонах обычных железобетонных балок в соответствии с действующими нормами.

### Литература

1. Яременко А.Ф. Уравнения плоско-напряженного состояния железобетона с трещинами при длительном действии нагрузки / А.Ф. Яременко, Е.У. Еньков. – Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, ч.2. – Одеса, 2013. – С. 266-273.
2. Сводный заключительный отчет по теме 4. 5. 6. Разработка методов расчета железобетонных конструкций из плоских элементов и совершенствование методов расчета линейных элементов. – ПКС СЭВ /НИИЖБ/. – М. – 1981. – 306 с.