

ступенчатым способом с применением выпрямителей и обратной полярности тока.

Рекомендованы мероприятия по нормальным условиям эксплуатации резервуара, заключающиеся в нанесении после выполнения работ по усилению антикоррозионной защиты металлоконструкций, восстановлении гидроизоляции, устройстве отстойки, исключающей застой дождевых и талых вод.

Приемочные испытания, а также эксплуатация резервуара в течение семи месяцев показали работоспособность и надежность принятого варианта усиления сооружения.

ТОНКОСТЕННЫЙ КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ РАСЧЕТА НА ЭВМ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А. Р. Туснин

В значительном числе пространственных систем неучет кручения приводит к большим погрешностям в определении усилий и деформаций. Широко распространенные вычислительные комплексы "Лира", "Гамма", "Зенит" и другие учитывают только чистое кручение стержневых элементов, что имеет место лишь в железобетонных и некоторых массивных металлических конструкциях. При расчете тонкостенных стержневых систем, в которых на кручение большое влияние оказывает секториальная жесткость, требуется либо применение стержневой аппроксимации с заменой тонкостенного элемента тремя стержнями объединенными жесткими поперечниками [1], либо оболочечных конечных элементов, что значительно усложняет расчетные схемы. Поэтому разработка конечного элемента для расчета тонкостенных стержневых конструкций представляет определенный практический интерес.

Прикладная теория расчета тонкостенных элементов с открытым профилем известна достаточно давно [2] и имеет хорошее экспериментальное подтверждение. На основе этой теории разработан метод перемещений для тонкостенных конструкций [3], примененный при решении ряда простых задач. Основные положения метода перемещений можно эффективно использовать для численного расчета сложных пространственных стержневых систем.

Тонкостенный конечный элемент (ТКЭ) обладает 14 степенями свободы (рис.1). В каждом узле в общем случае возникают три линейных, три угловых перемещения и депланация. Знаки линейных и угловых перемещений общепринятые, депланация считается положительной, если при взгляде вдоль плеча депланации ближайшая к наблюдателю полка поворачивается по часовой стрелке. С каждым стержнем связана местная

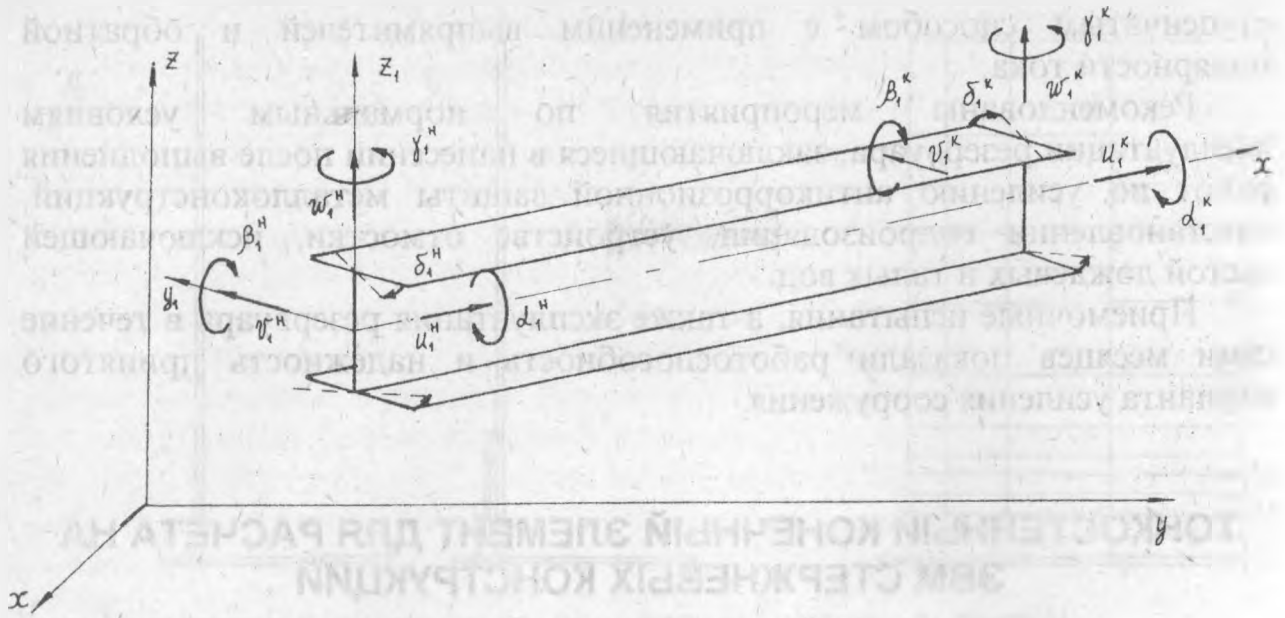


Рис.1. Тонкостенный конечный элемент.

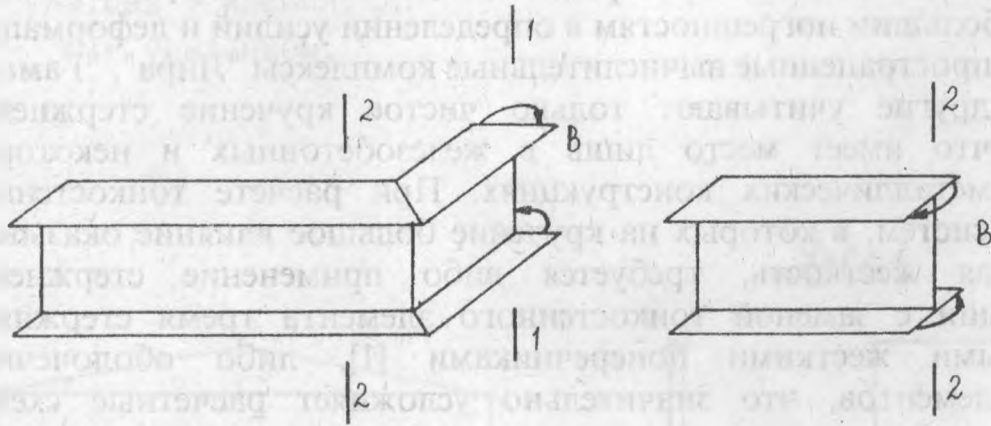


Рис.2. Распределение усилий в узле первого типа.

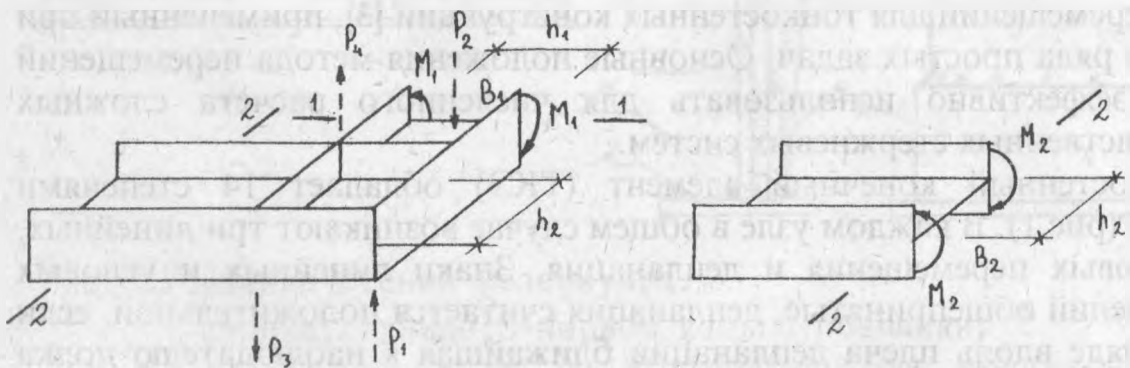


Рис.3. Распределение усилий в узле второго типа.

система координат (оси x_1, y_1, z_1) произвольно ориентированная относительно общей системы (оси x, y, z). Системы координат правые.

Обозначим через E_A продольную жесткость, E_y изгибную жесткость относительно оси y_1 , E_z изгибную жесткость относительно оси z_1 , G_t жесткость на чистое кручение, E_w секториальную жесткость, l длину элемента. Тогда матрица жесткости в местной системе координат будет иметь вид представленный в таблице 1.

Переход к матрице жесткости в глобальной системе координат осуществляется традиционно с использованием матрицы преобразования координат, имеющей вид:

$$T = \begin{vmatrix} C & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_k \end{vmatrix}, \text{ где } C = \begin{vmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{vmatrix} \text{ матрица направляющих косинусов:}$$

l_1, m_1, n_1 - направляющие косинусы оси x_1 ; l_2, m_2, n_2 - направляющие косинусы оси y_1 ; l_3, m_3, n_3 - направляющие косинусы оси z_1 ; d_n и d_k коэффициенты преобразования деформации соответственно начала и конца элемента равные 1 или -1 в зависимости от типа соединения элементов друг с другом.

Рассмотрим два наиболее распространенных способа сопряжения тонкостенных элементов (рис.2, 3). В узле первого типа изгибнокрутящие бимоменты в элементах совпадают как по величине, так и по знаку. Пусть в сечении 1-1 (рис.2) действует положительный бимомент, тогда из условия равновесия в сечении 2-2 возникает равный ему по величине и знаку бимомент. Поэтому в узлах первого типа d_n и d_k равны 1.

В узлах второго типа картина иная. Пусть в сечении 1-1 (рис.3) действует положительный бимомент V_1 . Его можно заменить сосредоточенными силами P_1, P_2, P_3, P_4 , равными по величине P . Значение P определяется так. Сначала находится изгибающий момент в полке в сечении 1-1: $M_1 = V_1/h_1$, где h_1 высота элемента в сечении 1-1. Затем определяется величина $P = M_1/h_2 = V_1/(h_1 h_2)$, где h_2 высота элемента в сечении 2-2. Пары сил P_1, P_2, P_3, P_4 образуют изгибающие моменты M_2 , действующие в полках в сечении 2-2: $M_2 = P h_1 = V_1/h_2$. Два равных по величине противоположно направленных момента образуют на плече h_2

Таблица 1

	u_1^H	v_1^H	w_1^H	α_1^H	β_1^H	γ_1^H	δ_1^H	u_1^K	v_1^K	w_1^K	α_1^K	β_1^K	γ_1^K	δ_1^K
u_1^H	$\frac{EA}{l}$	0	0	0	0	0	0	$-\frac{EA}{l}$	0	0	0	0	0	0
v_1^H		$\frac{12Ez}{l^3}$	0	0	0	$\frac{6Ez}{l^2}$	0	0	$-\frac{12Ez}{l^3}$	0	0	0	$\frac{6Ez}{l^2}$	0
w_1^H			$\frac{12Ey}{l^3}$	0	$-\frac{6Ey}{l^2}$	0	0	0	0	$-\frac{12Ey}{l^3}$	0	$-\frac{6Ey}{l^2}$	0	0
α_1^H				$\frac{\lambda E\omega}{l^3}$	0	0	$\frac{\alpha E\omega}{l^2}$	0	0	0	$-\frac{\lambda E\omega}{l^3}$	0	0	$\frac{\alpha E\omega}{l^2}$
β_1^H					$\frac{4Ey}{l}$	0	0	0	0	$-\frac{6Ey}{l^2}$	0	$\frac{2Ey}{l}$	0	0
γ_1^H						$\frac{4Ez}{l}$	0	0	$-\frac{6Ez}{l^2}$	0	0	0	$\frac{2Ez}{l}$	0
δ_1^H							$\frac{\mu E\omega}{l}$	0	0	0	$-\frac{\alpha E\omega}{l^2}$	0	0	$\frac{\gamma E\omega}{l}$
u_1^K								$\frac{EA}{l}$	0	0	0	0	0	0
v_1^K									$\frac{12Ez}{l^3}$	0	0	0	$-\frac{6Ez}{l^2}$	0
w_1^K										$\frac{12Ey}{l^3}$	0	$\frac{6Ey}{l^2}$	0	0
α_1^K											$\frac{\lambda E\omega}{l^3}$	0	0	$-\frac{\alpha E\omega}{l^2}$
β_1^K												$\frac{4Ey}{l}$	0	0
γ_1^K													$\frac{4Ez}{l}$	0
δ_1^K														$\frac{\mu E\omega}{l}$

Симметрично относительно
главной диагонали

В таблице 1:

$$\alpha = \frac{k^2 l^2 (\operatorname{ch}(kl) - 1)}{kl \operatorname{sh}(kl) - 2 \operatorname{ch}(kl) + 2}; \quad \gamma = \frac{kl (\operatorname{sh}(kl) - kl)}{kl \operatorname{sh}(kl) - 2 \operatorname{ch}(kl) + 2};$$

$$\lambda = \frac{k^3 l^3 \operatorname{sh}(kl)}{kl \operatorname{sh}(kl) - 2 \operatorname{ch}(kl) + 2}; \quad \mu = \frac{kl (kl \operatorname{ch}(kl) - \operatorname{sh}(kl))}{kl \operatorname{sh}(kl) - 2 \operatorname{ch}(kl) + 2};$$

$$\text{при } k = \sqrt{(Gt/E\omega)}$$

отрицательный (при взгляде вдоль плеча ближайший момент направ лен против часовой стрелки) бимомент $B_2=M_2 h_2=B_1$. Таким образом в элементах соединенных узлом второго типа действуют равные по величине противоположные по знаку бимоменты. Для учета этого у одного из элементов dn , если в узле находится начало элемента, или dk , если в узле находится его конец, должны быть равны -1. Значения dn или dk в узле для второго элемента равны 1.

Возможность использования предложенного конечного элемента подтверждена решением ряда тестовых задач. Рассмотрим результаты расчета двух простых систем (таблица 2). Первая конструкция представляет собой Г-образную прямоугольную раму, расположенную в горизонтальной плоскости ХОУ, выполненную из стального двутавра 30Ш3 по ГОСТ 26020-83, с соединением элементов длиной 6 м узлом первого типа, в начале координат рама жестко заделана, а на свободном конце загружена моментами $M_x=M_y=M_z=-10$ кН м. Вторая рама отличается от первой применением узла второго типа и острого угла 30о в плоскости ХОУ между элементами. Сопоставлялось два способа расчета: с использованием ТКЭ по программе, разработанной автором на языке Turbo-Basic, и метода стержневой аппроксимации [1] с применением вычислительного комплекса "Ли́ра".

Перемещения свободного конца рамы

Таблица 2

Перемещения	Первая рама		Вторая рама	
	ТКЭ	Ли́ра	ТКЭ	Ли́ра
u, м	0,1283	0,1283	0,0092	0,0091
v, м	-0,0428	-0,0428	0,0098	0,0097
w, м	-5,4488	-5,6891	-2,5855	-2,5327
a, рад	-0,9102	-0,9502	-1,2713	-1,2366
b, рад	-1,1497	-1,1520	0,2169	0,2043
g, рад	-0,0285	-0,3060	-0,0041	-0,0041
d, рад/м	-0,1916	-0,1916	0,0712	0,0712

На основании данных таблицы 2 можно сделать вывод о хорошем соответствии результатов полученных разными способами и возможности использования ТКЭ для расчета конструкций из тонкостенных элементов с открытым профилем.

При составлении расчетных схем с использованием ТКЭ следует большое внимание уделять узловым соединениям элементов, т.к. в реальных конструкциях в узлах возможны эксцентриситеты, связи или шарниры. Необходимо следить за правильным заданием внешних бимоментов, действующих на систему от изгибающих моментов и продольных сил.

Литература

1. Деменев М.Г. Разработка конструкций покрытий с применением мембранных панелей // Автореф. дис. канд. техн. наук.- М., 1990. -24 с.
2. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни.- М.,:Стройиздат, 1940.
3. Бычков Д.В. Расчет балочных и рамных систем из тонкостенных элементов. -М.,: Стройиздат, 1948. -208 с.

РАСЧЕТ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО НАКЛОННОМУ СЕЧЕНИЮ НА ДЕЙСТВИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ СИЛЫ С УЧЕТОМ НАГЕЛЬНОГО ЭФФЕКТА В АРМАТУРЕ

В. Н. Малиновский, К. А. Зинов

В изгибаемых элементах в наклонном сечении, проходящем по наклонной трещине и бетону над ее вершиной, в общем случае, действуют: продольная N_b и поперечная Q_b составляющая сил в бетоне, продольная Q_{sw} и поперечная в ортогональной Q_s^{sw} и наклонной $Q_s^{s,inc}$ составляющие в поперечной арматуре (хомутах и отгибах), продольная N_s и поперечная Q_s^{long} составляющая сил в продольной арматуре. Учет всех факторов, влияющих на несущую способность по наклонному сечению, встречает трудности, поэтому для практических расчетов нормы [1] используют приближенные приемы и методы, учитывающие действие только трех составляющих Q_b , Q_{sw} , Q_s^{inc} . При этом, действительная несущая способность, зачастую, для балок с однозначной эпюрой моментов в зоне среза завышена, а с двухзначной - занижена.

Исследования последних лет, в том числе [2, 3], доказывают необходимость учета в работе на действие поперечных сил четвертого фактора - т.н. "нагельных сил в арматуре" (Q_s). В работе, на основании проведенных исследований, предлагается методика учета нагельных сил Q_s в определении несущей способности по поперечной силе в балках с однозначной и двузначной эпюрами изгибающих моментов в зоне среза.

Исследования проводились на балках прямоугольного сечения, без поперечного армирования, но с наличием продольной ненапрягаемой рабочей арматуры, расположенной в верхней и нижней зонах (тип 1) и предварительно напряженных с прямолинейной и отогнутой арматурой (тип 2). Балки первого типа испытывались со знакопеременной (рис. 1а), а второго типа с однозначной (рис. 1б) эпюрами изгибающих моментов в зоне среза. Кроме того в экспериментах на балках первого типа [4] варьировались количество арматурных стержней при постоянном проценте армирования, а также соотношение опорного и пролетных моментов (M_{sup}/M_{sp}) и величина относительного пролета среза ($\alpha\sqrt{h_0}$).

Установлено, что для балок со знакопеременной эпюрой моментов при $|M_{sup}/M_{sp}| > 0.25$ характерно неустойчивое развитие наклонных трещин (НТ) и сдвиговая форма перемещения частей балки, при которых НТ выходит своими вершинами на нижнюю и верхнюю грани балки,