

**ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ
УСТОЙЧИВОСТИ ПОЛОГИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
ОБОЛОЧЕК С УЧЕТОМ НАЧАЛЬНЫХ НЕСОВЕРШЕНСТВ**

Коломийчук Г.П. *(Одесская государственная академия
строительства и архитектуры, г. Одесса)*

Разработаны практические рекомендации, уточняющие расчет на устойчивость железобетонных оболочек по нормативным документам, с помощью поправочного коэффициента на начальные несовершенства формы срединной поверхности.

Наличие малых начальных геометрических неправильностей оболочечных конструкций способствует выпучиванию. Для простых линейных систем доказано, что наибольшее снижение критических нагрузок наблюдается, когда начальный прогиб имеет форму, подобную форме потери устойчивости идеальной системы [1]. И хотя избирательность нелинейных систем значительно сложнее, многие авторы [2, 3] в условиях отсутствия статистической информации о распределении начальных несовершенств распространяли это правило на случай деформирования оболочек.

Сопоставление результатов испытаний оболочек на устойчивость с расчетными данными, полученными теоретическим путем, указало на большие расхождения между значениями критических нагрузок, относящиеся к номинально идентичным оболочкам. При этом значения экспериментальных верхних критических нагрузок оказываются ниже теоретических.

Интерес к этой задаче обусловлен тем, что значения нагрузок в бифуркационных точках оказываются в ряде случаев меньшими, чем верхние критические нагрузки по осесимметричной теории, а это значит, что может произойти смена форм равновесия оболочки до того, как она достигнет верхней критической нагрузки по осесимметричной форме.

Для определения минимальной критической нагрузки применен метод начальных несовершенств [4]. Используя математическую модель [5], разработан программный комплекс NESVET по исследованию неосесимметричного деформирования несовершенных пологих оболочек.

После ввода и контроля исходных данных производится анализ информации о поле начальных несовершенств срединной поверхности оболочки. Возможны два варианта:

- а) амплитуды несовершенств по полю оболочки известны;
- б) амплитуды несовершенств неизвестны.

В первом варианте выполняется разложение в ряд Фурье поля начальных несовершенств по переменным x и y ; определяется форма потери устойчивости /ФПУ/. Слагаемые ФПУ подбираются из условия минимума бифуркационной нагрузки совершенной оболочки. В случае отсутствия неосесимметричной формы потери устойчивости, производится проверка на потерю устойчивости совершенной оболочки, при этом ФПУ подбирается с одним несимметричным слагаемым, которое приводит к неосесимметричному деформированию при больших кривизнах, но с наименьшей величиной нагрузки ветвления. Отсутствие бифуркации ведет к осесимметричному расчету на устойчивость по ФПУ, совпадающей с формой начальных несовершенств /ФНН/.

Во втором варианте первоначально проводится анализ геометрии совершенной оболочки на возможность неосесимметричного деформирования и по наименьшей критической нагрузке подбирается ФПУ. Далее по ФПУ и известным геометрическим характеристикам расчетной модели осуществляется поиск информации о расчетах несовершенных оболочек выполненных ранее /по данной программе или другими авторами/.

Положительный ответ приводит к окончанию работы программы. Если расчеты отсутствуют, то подбор невыгодной ФНН ведется методами математического программирования.

По ФПУ, ФНН и начальному значению параметра формируется система нелинейных алгебраических уравнений. В качестве параметра выбраны: величина поперечной нагрузки q и амплитуда относительного прогиба f_{ij} . Вторым вариантом используется в случае не единственности решения, получаемого с первым параметром.

Решение системы нелинейных алгебраических уравнений выполняется по методу последовательных приближений со специальной подготовкой начальных значений неизвестных. Выход из итерационного процесса производится при достижении точности ε .

Для ускорения сходимости итерационного процесса применяется метод неполной релаксации. Коэффициенты релаксации при неизвестных f и φ определяются по методу наименьших квадратов по трем предыдущим значениям векторов.

По f_{ij}, φ_{ij} , полученным из решения системы нелинейных алгебраических уравнений, вычисляется определитель матрицы Якоби. Если определитель равен нулю, или найденная величина отличается по знаку от предыдущей – имеем точку бифуркации, что служит признаком окончания расчета, а полученные результаты записываются в банк данных и выводятся на печать.

По результатам проведения численных расчетов получены поправочные коэффициенты для определения допустимых критических нагрузок пологих прямоугольных в плане цилиндрических оболочек с диапазоном кривизн $30 \leq \bar{k} \leq 100$ (таблица 1). Здесь $\bar{k} = b^2 / (R \cdot h)$; b – ширина оболочки; R – радиус кривизны оболочки; h – толщина оболочки.

Таблица 1

Поправочный коэффициент Δ^{nn} для расчета устойчивости цилиндрических оболочек

b/h R/h	60	80	100	110	120	130	140	150	160	170
100	0,547	0,546	0,780							
120	0,603	0,514	0,657							
140		0,511	0,581	0,679						
160		0,518	0,541	0,608	0,701				$k_2 > 100$	
180		0,551	0,519	0,560	0,630	0,735				
200		0,582	0,504	0,519	0,585	0,666	0,766			
220			0,511	0,517	0,533	0,603	0,695			
240		$k_2 < 30$	0,517	0,506	0,525	0,573	0,644	0,734		
260			0,528	0,510	0,518	0,551	0,606	0,684	0,769	
280			0,550	0,514	0,508	0,527	0,570	0,633	0,714	
300			0,570	0,517	0,507	0,520	0,553	0,604	0,671	0,756

Расчет оболочек на устойчивость следует вести по Приложению 6 «Руководства по проектированию железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий» с учетом поправочного коэффициента на начальные несовершенства формы по формуле:

$$q_{нн}^{уст} = q_{рук}^{уст} \cdot \Delta_{цo(одк)}^{нн} \quad (1)$$

Здесь: $q_{рук}^{уст}$ – критическая нагрузка рассчитанная по «Руководству...» [6]; $\Delta_{цo}^{нн}$ – поправочный коэффициент для учета влияния начальных несовершенств формы срединной поверхности; $q_{нн}^{уст}$ – критическая нагрузка, рассчитанная с учетом невыгодных начальных несовершенств.

Многочисленные обмеры реальных конструкций показали, что фактические начальные несовершенства не имеют регулярного распределения, а носят локальный характер, распространяясь в ограниченной области [7, 8].

Для выявления наименьшей предельной критической нагрузки пологой оболочки двойкой положительной кривизны выделили форму несовершенства в виде локальной ограниченной вмятины [9]. Основные дифференциальные нелинейные уравнения в перемещениях [10] приведены к алгебраическим с применением метода конечных разностей. Положение вмятины на плане оболочки определяется точками конечно-разностной сетки.

Минимальные размеры вмятины на плане оболочки зависят от расстояния между узлами конечно-разностной сетки и назначаются таким образом, чтобы количество узлов в направлении координатных осей $x(y)$ было не менее трех внутри области вмятины. Максимальное амплитудное значение отклонения в центре вмятины не превышает половины толщины оболочки. При больших значениях несовершенств изделие бракуется.

Гладкие оболочки положительной гауссовой кривизны при нагружении вертикальной равномерно распределенной нагрузкой теряют устойчивость по-разному, в зависимости от параметра кривизны.

Будем различать пологие оболочки по величине параметра кривизны ($\bar{k} = a^2 / R_1 h + b^2 / (R_2 h)$) так: $\bar{k} \leq 60$ – малая; $60 < \bar{k} \leq 200$ – средняя; $200 < \bar{k} \leq 1000$ – большая; $\bar{k} > 1000$ – очень большая.

Оболочки малой кривизны теряют устойчивость с прощелкиванием всего поля; средней, большой и очень большой кривизны – выпучива-

ются с образованием изолированной одиночной вмятины в углу, захватывающей не более 10 % поверхности оболочки.

Определение минимальных критических нагрузок пологих оболочек двойкой кривизны с локальными несовершенствами формы под действием равномерной вертикальной нагрузки выполнялось по программе NESSPO. Для исследования выбраны оболочки малой и средней кривизн.

По результатам расчетов определены поправочные коэффициенты $\Delta_{одк}^{nn}$ (таблица 2), которые дают возможность учесть влияние начальных несовершенств на величину критической нагрузки по формуле (1).

Таблица 2

Поправочный коэффициент Δ^{nn} для расчета устойчивости оболочек двойкой кривизны

b/h R/h	100	120	140	160	180	200	220	240
200	1,094	0,838	0,633	1,111				
220	1,147	0,911	0,691	0,975	1,220			
240	1,191	0,984	0,748	0,791	1,165			
260		1,032	0,803	0,631	1,079			
280		1,078	0,861	0,675	0,966	1,205		
300		1,117	0,912	0,719	0,827	1,154		
320		1,153	0,965	0,762	0,659	1,083		
340			1,007	0,805	0,651	0,995	1,202	
360			1,042	0,846	0,685	0,888	1,160	
380			1,077	0,888	0,719	0,764	1,107	
400			1,106	0,930	0,755	0,622	1,038	
420			1,133	0,970	0,788	0,651	0,959	1,178
440				1,001	0,821	0,678	0,867	1,132
460				1,035	0,854	0,706	0,762	1,085
480				1,056	0,887	0,734	0,647	1,026

Продолжение таблицы 2

b/h R/h	160	180	200	220	240	260	280	300
500	1,080	0,920	0,762	0,639	0,958	1,165		
520	1,103	0,950	0,789	0,663	0,882	1,128		
540	1,125	0,985	0,817	0,689	0,797	1,087		
560		1,005	0,844	0,711	0,704	1,035		
580		1,026	0,870	0,734	0,626	0,979	1,165	
600		1,047	0,896	0,756	0,647	0,917	1,133	
620		1,068	0,923	0,779	0,665	0,848	1,098	
640		1,088	0,950	0,802	0,686	0,773	1,058	
660		1,106	0,976	0,824	0,705	0,690	1,012	
680		1,123	0,995	0,846	0,723	0,625	0,959	1,152
700			1,009	0,867	0,742	0,641	0,905	1,117
720			1,031	0,891	0,762	0,659	0,846	1,085
740			1,047	0,921	0,779	0,674	0,779	1,046
760			1,067	0,937	0,801	0,693	0,712	1,006
780			1,078	0,953	0,818	0,707	0,636	0,960
800			1,095	0,978	0,838	0,726	0,633	0,914

Вывод:

Полученные поправочные коэффициенты, учитывающие влияние начальных несовершенств формы, позволяют приблизить расхождения между экспериментальными и теоретическими значениями критических нагрузок.

Литература

1. Тимашев С.А. Устойчивость подкрепленных оболочек. – М.: Стройиздат, 1974. – 256 с.

2. Тонкостенные оболочечные конструкции: теория, эксперимент и проектирование/Сб. трудов. М.: Машиностроение, 1980. – 607 с.
3. Потеря устойчивости и выпучивание конструкций: теория и практика/Под ред. Э.И.Григолюка. – М.: Наука, 1991. – 423 с.
4. Кантор С.Л., Тимашев С.А. Метод начальных несовершенств в задачах устойчивости оболочек/Исследования по теории сооружений, вып. 25. – М., 1987. – с. 46-56.
5. Коломийчук Г.П., Лесечко А.В. Математическая модель поведения пологих оболочек двойкой кривизны с несовершенствами формы при поперечном нагружении//Вісник ОДАБА. – Одеса: ВМК “Місто майстрів”. – 2001. - №5. – С. 70-74.
6. Руководство по проектированию железобетонных конструкций покрытий и перекрытий. – М.: Стройиздат, 1979. – 421 с.
7. Зильбер Я.М. Фактические геометрические несовершенства железобетонных оболочек покрытий положительной кривизны//Проблемы надежности в строительном проектировании. – Свердловск: УралпромстройНИИпроект, 1972. – С. 65-70.
8. Борзых Е.П., Хайдуков Г.К., Шугаев В.В. Исследование влияния начальных несовершенств срединной поверхности на напряженно-деформированное состояние пологих ортотропных оболочек/Труды VIII Всесоюзной конференции по теории оболочек и пластин. – М.: Наука, 1973. – С. 619-621.
9. Коломийчук Г.П., Ярцев А.В. Устойчивость упругих оболочек двойкой кривизны с ограниченными локальными несовершенствами//Вісник ОДАБА. – Одеса: ВМК “Місто майстрів”. – 2000. - № 2. – С. 172-175.
10. Коломийчук Г.П. Устойчивость несовершенных пологих железобетонных оболочек/В сб. «Резервы прочности бетонных и железобетонных конструкций». – К.: УМК ВО, 1989. – С. 111-115.