

сти, благоприятным перераспределением легирующих элементов.

Модифицирование стали 15ХЗМ1ФЛ церием повышает комплекс механических свойств как в исходном состоянии, так и после продолжительных выдержек при температурах 300, 450 и 565 °С.

Присадка церия способствует измельчению зерна и формированию дисперсной карбидной фазы.

1.Крещановский Н.С., Сидоренко М.Ф. Модифицирование стали. – М.: Металлургия, 2000. – 210 с.

2.Переверзев Е.С. Спектральный анализ случайных процессов в задачах точности и надежности // Техническая механика. – 2007. – № 2. – С.80-91.

3.Бурлаченко О.В. Концептуальная модель управления эксплуатационными свойствами машин и технологического оборудования // Изв. вузов. Машиностроение. – 2003. – №7. – С.30-32.

4.Любченко А.П. и др. Учет условий эксплуатации машин при решении задачи унификации технологических комплексов // Проблемы техники. – 2003. – №1. – С.77-81.

Получено 11.11.2009

УДК 539.3 : 624.21

В.С.ШМУКЛЕР, д-р техн. наук, А.А.ЧУПРЫНИН, канд. техн. наук,
Р.АББАСИ

Харьковская национальная академия городского хозяйства

МЕТОД НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ПЛИТ И ОБОЛОЧЕК

Рассматриваются методология проведения и устройство нагружения, реализующие экспериментальные испытания оболочечных конструкций при действии кратковременных и длительных нагрузок. Особо отмечено, что разработанные алгоритмы последовательности экспериментов могут применяться непосредственно на строительной площадке без остановки основного производства. Учитывая следящий характер нагружения, предлагаются способы вычисления приведенных и корректирующих возмущений. Предложенный метод испытаний защищен патентом Украины [1].

Розглядаються методологія проведення й устрій навантаження, що реалізують експериментальні випробування оболонкових конструкцій при дії короткочасних і тривалих навантажень. Особливо відзначено, що розроблені алгоритми послідовності експериментів можуть бути застосовано безпосередньо на будівельному майданчику без зупинки основного виробництва. З огляду на особливості навантаження, пропонуються способи обчислення наведених і коригувальних збуджень. Запропонований метод випробувань захищений патентом України [1].

We consider the methodology of the device and loading, a pilot test of shell structures under the action of short-and long-term loads. Emphasized that the algorithms developed sequence of experiments can be applied directly to the construction site without stopping the main production. Given the nature of the load tracking, proposed methods for calculating and correcting the above perturbations. The proposed test method has been patented in Ukraine [1].

Ключевые слова: железобетонная плита, системы измерения и нагружения, натурные испытания, экспериментальные исследования.

Создание и совершенствование конструкций, установление уровня безопасности и надежности существующих и возводимых элементов, в совокупности с репрезентативностью применяемых расчетных моделей, определяют необходимость проведения натурных испытаний [2, 3]. В пользу сказанного можно привести и ряд других аргументов. Например, необходимость учета специфики сопротивления материалов новых видов, целесообразность оптимизации конструктивных параметров, уточненный учет условий опирания, а также возникающих полей перемещений и нагрузок, исключение влияния масштабного фактора, необходимость проведения качественного и корректного тестирования многофакторных математических моделей и многое другое. Тем не менее, и это хорошо известно, натурные эксперименты представляют собой весьма дорогостоящий и времязатратный процесс. Однако, альтернатива этим исследованиям в виде лабораторных испытаний или теоретического моделирования либо достаточно условны, либо неточны. В связи со сказанным, представляется перспективным развитие методов натурных экспериментов, но с учетом концепции Рене Декарта – любая экономия, в конечном итоге, есть экономия времени.

В настоящей работе для экспериментального исследования тонкостенных конструкций в виде плит и (или) оболочек предлагается новый метод, использующий специальное устройство для натурного нагружения их вертикальными кратковременными и длительно действующими нагрузками [1]. Суть его сводится к следующему. На внешней, как правило, верхней поверхности конструкции создается емкость (бассейн) заданной конфигурации для воды. Для этого используются плоские панели облегченного типа или цилиндры произвольной формы и без днищ. Внутри емкостей укладывается гидрофобная пленка. Вода в емкости подается и отводится по гибким трубопроводам. Уровень воды в емкости регулируется автоматически запорным клапаном в соответствии с показаниями на линейке, закрепленной на одной из бортовых панелей. Подобное возможно благодаря уникальному значению плотности воды $\gamma=1 \text{ т/м}^3$. Остановимся на конструктивных особенностях устройства конструкции. Так, на рис.1 изображено описанное выше устройство для натурного испытания на вертикальные нагрузки плит и оболочек покрытий и перекрытий, на рис.2 – его фронтальная проекция. Устройство содержит собственно исследуемую конструкцию 1, установленную на опоре 2, которая может являться частью конструкции, щиты, создающие резервуар, установленные по контуру нагруженной области 3, подводящие 4 и отводящие 5 патрубки, водонепроницаемую пленку 6. Внутри резервуара могут быть рас-

положены водонепроницаемые подвижные щиты (панели) 7, разделяющие его на изолированные ячейки, заполненные водой 8. Использование пленки для гидроизоляции обусловлено тем, что она имеет ряд преимуществ перед другими материалами. В частности, это относительно невысокая ее стоимость, а также стоимость работ по укладке, долговечность, возможность сварки полимерных элементов, надежность, высокая оборачиваемость, простота придания ей разнообразных форм для изоляции ячеек. Такими свойствами обладают многие органические материалы, например: полиэтилен, полипропилен, тилпен.

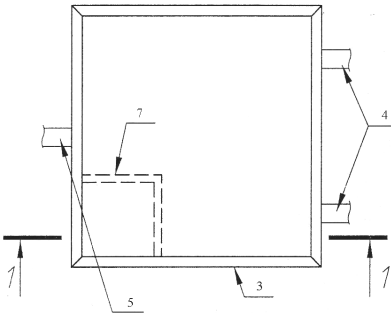


Рис. 1 – Вид установки в плане

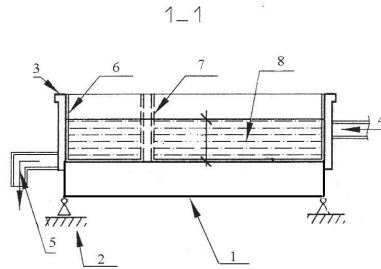


Рис. 2 – Фронтальная проекция установки

Кроме перечисленных достоинств конструкции следует отметить простоту стыковки ее с системой измерения. Проведенный анализ показал, что большие геометрические размеры строительных конструкций и значительная стоимость проведения натурных испытаний, предопределяют проведение массовой тензометрии с целью получения возможно более полных данных о поведении конструкции. Обработка этих данных непосредственно в процессе эксперимента и после его завершения позволяет не только оценить характеристики конкретной конструкции, но и усовершенствовать методы ее расчета. Не менее интересным моментом, на наш взгляд, является также возможность объединения систем нагружения и измерения. В связи с этим рассмотрим особенности такого процесса.

На рис.3 представлена структурная схема разработанной нами автоматизированной подсистемы научных исследований (АСНИ) для натурных силовых испытаний конструкций [4]. В качестве параметров, которые требуется установить при испытаниях, приняты уровни нагружения и величины перемещений. Ступени нагружения устанавливаются, например, по уровню воды в емкости. Величины перемещений в различных частях конструкции фиксируются первичными преобра-

зователями (ПП) и передаются на регистрирующую систему измерительного комплекса. В процессе разработки системы были изготовлены ПП перемещения в виде индуктивных датчиков и составлена кинематическая схема измерения. Она включает механические прогибомеры типа БПАО, а также блоки и нити, которые перед испытанием собираются в передающие цепи.

В процессе испытания задающая система измерительного комплекса передает команды на снятие отсчетов датчиками ПП, причем, многократно в течение большого промежутка времени (3,5 ч) и с заданными временными интервалами (5 мин). В качестве регистрирующего устройства принята измерительная система СИИТ-2, предоставляющая возможность многократного измерения сигналов датчиков и преобразующая их результаты в цифровой вид. Последнее значительно ускоряет процесс сбора, обработки и передачи информации.

В настоящее время тензометрические системы СИИТ-3 (100 каналов) и СИИТ-2 (1000 каналов) являются наиболее эффективным средством для решения задач массовой тензометрии благодаря таким их качествам, как высокая надежность, точность измерений, небольшие габаритные размеры и относительно низкая стоимость.

Для расширения сервисных возможностей к измерительно-информационной системе типа СИИТ подключается персональная ЭВМ с соответствующим прикладным программным обеспечением. В качестве последнего использован комплекс "ПОРТ", разработанный в Харьковском аэрокосмическом университете и адаптированный для описываемой подсистемы АСНИ. "ПОРТ" имеет простую специализированную базу данных, размещенную в четырех файлах прямого доступа. Результаты обработки представляются в табличной и графической формах. "ПОРТ" реализован в виде комплекса программ, включающих:

- программу подготовки эксперимента, обеспечивающую "дружественный" ввод исходных данных, встроенную систему контекстных подсказок и "поводыря", существенно облегчающих ввод характеристик ПП, материалов и т.д., а также конфигурирование схемы коммутации измерительных каналов;
- программу сбора показаний, обеспечивающую проверку работоспособности измерительных систем и ПП, оперативное представление результатов эксперимента в форме таблиц и графиков, сбор показаний в "ручном" (по командам оператора) или автоматическом (по таймеру) режимах;
- программу обработки показаний ПП, реализующую традиционные методы одиночной и групповой обработки тензометрической ин-

формации. Результаты обработки деформаций и напряжений сопровождаются оценками их достоверности. Они аппроксимируются различными моделями: линейное упругое деформирование, пластическое деформирование, сжатие с изгибом (потеря устойчивости), кусочно-линейное упругое деформирование и т.д. При этом каждая из моделей идентифицируется устойчивыми статистическими методами и может применяться для прогнозирования деформаций, напряжений и критических нагрузок. По результатам обработки показаний одно- и двусторонних тензорозеток (прямо- и равноугольных) выдаются все параметры плоского напряженного состояния;

- программу представления результатов обработки экспериментов, обеспечивающую формирование готового отчета, содержащего материалы в табличной и графической формах, вид которых может быть скорректирован по желанию пользователя.

Структурная схема АСНИ предусматривает управляющие связи от задающего узла к силовой установке, показанные на рис.3 Функциональная схема самого измерительного комплекса детализирована на рис.4.

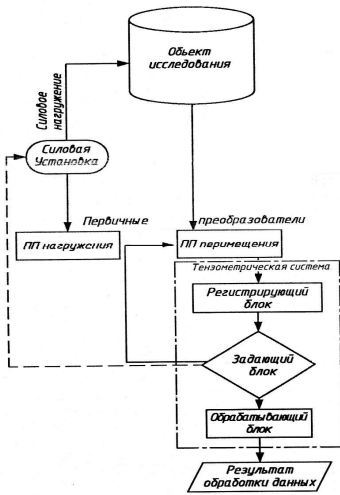


Рис.3 – Структурная схема АСНИ

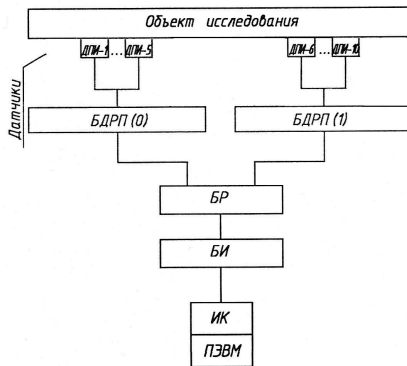


Рис.4 – Функциональная схема измерительного комплекса

Работа комплекса осуществляется следующим образом. Сигналы от датчиков линейных перемещений поступают на вход блоков дистанционного релейного переключения (БДРП), работой которых управляет блок распределения (БР). Метод выбора каналов – адрес-

ный, что позволяет опрашивать датчики в заданной последовательности.

Номер выбираемого измерительного канала (ИК) задается двоично-десятичным кодом, поступающим в блок измерения (БМ) от ПЭВМ (рис.5) через интерфейс ИК. В соответствии с этим кодом вырабатываются управляющие сиг-



Рис.5

налы номера БДРП и номера датчика. Эти сигналы от блока измерения (БИ) поступают на БР и далее на выбранный БДРП, обеспечивая подключение выбранного датчика к измерительным линиям.

Импульс вывода из ЭВМ кода номера канала одновременно является сигналом запуска БИ. По этому сигналу записывается выбранная измерительная схема и начинается процесс измерения.

Функционирующая прикладная программа обеспечивает циклическое повторение процессов измерения, что позволяет опросить заданную группу датчиков и получить в памяти ЭВМ соответствующий массив данных. Таким образом, предлагаемая измерительная система не только предоставляет пользователю высокий сервис при сборе и обработке необходимой информации, но и является основным звеном управляющей автоматизированной системы испытаний строительных конструкций. Ее эксплуатация обуславливает новый качественный уровень исследований и порождает эффективные подходы при изучении больших систем.

Рассмотренный метод обеспечивает реализацию активного нагружения, разгрузки, повторных циклов, длительных загрузений, он также допускает организацию нескольких ванн (путем установки перегородок), что дает возможность моделирования симметричных и несимметричных фрагментарных загрузений конструкции (полосовая нагрузка через пролет и сплошная по всей площади).

Эти и другие виды нагружения можно смоделировать с помощью описанной выше установки. Так, на рис.6 показан общий вид установки, а на рис.7 – смонтированный резервуар для создания распределенной по всей площади перекрытия распределенной нагрузки.

На рис.8 подвижные щиты установлены таким образом, чтобы смоделировать полосовую нагрузку. Кроме того, данная установка позволяет создавать нагрузку, границы которой ориентированы под

любым углом к сторонам перекрытия, например, по диагонали (рис.9).

На рис.10 расстановка щитов обеспечивает нагружение в произвольных ячейках. Кроме того, существует возможность моделирования локального приложения нагрузки, когда она распределена на участке произвольной формы, размеры которого намного меньше размеров плиты (рис.11).



Рис.6



Рис.7



Рис.8



Рис.9



Рис.10



Рис.11

Предложенный метод применим также для проведения неразрушающих испытаний конструкций, реализуемых непосредственно на строительной площадке без остановки основного производства и больших затрат.

Важным обстоятельством является возможность плавной (монотонной) подачи нагрузки, что обеспечивает (в отличие от большинства традиционных методов) строгое установление переходов конструкции и материалов из одного состояния в другое (появление пластических деформаций, образование трещин, проявление бифуркаций и т.д.).

Тем не менее, предложенная система нагружения имеет определенную особенность. Она состоит в том, что на исследуемую конструкцию воздействует следящая нагрузка. Величина нагрузки в данном случае зависит от полученных прогибов, которые, в свою очередь, зависят от уровня нагрузки. В результате при нагружении исследуемого элемента первоначально равномерно распределенной нагрузкой, после деформирования уровень воды меняется, и будет различным в нагруженной области. Это приводит к изменению величины прогибов, и, следовательно, к изменению уровня распределенной по площади нагрузки. Обозначенное обстоятельство особенно влияет на искажение поля деформаций при длительных нагружениях, при которых за счет ползучести и реологической изменчивости жесткостных параметров, рост прогибов может достигать существенных величин. В связи со сказанным следует оценить влияние следящего характера нагрузки на процесс деформирования плиты (оболочки). С этой целью рассмотрим изгиб изотропных тонких пластин, напряженно-деформированное состояние которых может быть описано уравнением Софи Жермен. К данному уравнению следует присовокупить граничные условия, которые должны соответствовать реальным условиям закрепления. Без сужения общности рассуждений, примем контурное шарнирное опирание пластины. Расположив начало глобальной системы декартовых координат в одном из углов пластины, для кромки $x = 0$ получим:

$$W|_{x=0} = 0; M_x|_{x=0} = -D \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (1)$$

где $W(x, y)$ – прогиб пластины; $M_{x,y}$ – изгибающий момент вдоль оси x .

Аналогично можно записать граничные условия для остальных трех кромок. Решение краевой задачи в данном случае заключается в том, чтобы найти функцию прогиба срединной поверхности, удовлетворяющую разрешающему уравнению и условиям закрепления, а

именно:

$$\nabla^2 \nabla^2 W(x, y) = \frac{q(x, y)}{D}; \quad (2)$$

$$W|_{\Gamma} = \frac{\partial^2 W}{\partial n_{\Gamma}^2} \Big|_{\Gamma} = 0, \quad (3)$$

где $q(x, y)$ – заданная нагрузка на пластину; D – цилиндрическая жесткость; Γ – граница области; n – нормаль к границе.

Согласно методу Навье [5], решение (2) представим в виде двойного тригонометрического ряда по синусам. Такое представление прогиба позволяет точно удовлетворить граничным условиям. Внешнюю нагрузку при этом также представим в виде двойного тригонометрического ряда.

Интерес для рассматриваемой задачи представляют частные случаи нагружения, такие как равномерно распределенное по всей площади плиты:

$$q(x, y) = q_0 = \text{const}, \quad (4)$$

и следящая нагрузка, величина которой зависит от прогибов, возникающих в пластине. Такое нагружение реализуется, например, в том случае, когда рассматривается деформирование нагруженной водой плиты, уровень которой поддерживается и остается постоянным:

$$q(x, y) = q_0 + \gamma \cdot w(x, y). \quad (5)$$

Здесь q_0 – величина нагрузки в недеформированном состоянии, которая остается неизменной в процессе деформирования и состоит из собственного веса плиты и равномерного давления воды; γ – удельный вес воды.

В отличие от (2) напряженно-деформированное состояние пластины под действием следящей нагрузки (5) можно записать в виде:

$$D \nabla^2 \nabla^2 W(x, y) = q_0 + \gamma \cdot W(x, y)$$

или

$$\nabla^2 \nabla^2 W(x, y) - \frac{\gamma}{D} W(x, y) = \frac{q(x, y)}{D}. \quad (6)$$

Решение (6) также будем искать в виде двойного тригонометрического ряда по синусам, удовлетворяющего граничным условиям (3). Это неоднородное дифференциальное уравнение четвертого порядка в частных производных эллиптического типа. Оно также, как и уравнение Софи Жермен, содержит бигармонический оператор Лапласа и по

форме соответствует уравнению изгиба тонких пластин на упругом основании с отрицательным коэффициентом постели.

На основании введенных положений:

$$W(x, y) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M a_{nm} \sin\left(\frac{n\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{m\pi}{b} y\right), \quad (7)$$

где a, b – размеры пластины вдоль осей x и y .

$$q(x, y) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M q_{nm} \sin\left(\frac{n\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{m\pi}{b} y\right), \quad (8)$$

а коэффициенты q_{nm} находятся, согласно разложения Фурье.

Коэффициенты в разложении прогибов a_{nm} в обоих случаях будем искать, подставив выражение прогибов (7) в исходные уравнения (2) и (6). Результаты вычислений сведены в табл.1.

Таблица 1

Равномерная нагрузка	Следящая нагрузка
$\nabla^2 \nabla^2 W(x, y) = \frac{q(x, y)}{D};$	$\nabla^2 \nabla^2 W(x, y) - \frac{\gamma}{D} W(x, y) = \frac{q(x, y)}{D}$
$\frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial y^4} = \frac{q(x, y)}{D}.$	$\left(\frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 W(x, y)}{\partial y^4} \right) - \frac{\gamma}{D} W(x, y) = \frac{q(x, y)}{D}.$
Выражения для a_{nm} :	
$a_{nm} \pi^4 \left[\left(\frac{n}{a} \right)^2 + \left(\frac{m}{b} \right)^2 \right] = \frac{q_{nm}}{D};$	$a_{nm} \pi^4 \left\{ \left[\left(\frac{n}{a} \right)^2 + \left(\frac{m}{b} \right)^2 \right]^2 - \frac{\gamma}{D} \right\} = \frac{q_{nm}}{D};$
Функция прогибов:	
$W(x, y) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{q_{nm}}{D \pi^4 \left[\left(\frac{n}{a} \right)^2 + \left(\frac{m}{b} \right)^2 \right]} \times \sin\left(\frac{n\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{m\pi}{b} y\right).$	$W(x, y) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{q_{nm}}{D \pi^4 \left\{ \left[\left(\frac{n}{a} \right)^2 + \left(\frac{m}{b} \right)^2 \right]^2 - \frac{\gamma}{D} \right\}} \times \sin\left(\frac{n\pi}{a} x\right) \sin\left(\frac{m\pi}{b} y\right).$

При $q(x, y) = q_0$ решение представлено в табл.2.

Для практического использования выражение для прогибов удобно представить в таком виде: $w_{\max} = \alpha q_0 a^4 / Eh^3$, где α – коэффициент, зависящий от соотношения сторон пластины:

$$\alpha = \frac{192}{\pi^6} (1 - \nu^2) \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi}{2} \sin \frac{n\pi}{2}}{mn \left(m^2 + n^2 \frac{a^2}{b^2} \right)^2}.$$

Таблица 2

Равномерная нагрузка	Следящая нагрузка
Коэффициенты разложения	
$a_{nm} = \frac{16q_0}{D\pi^6 mn} \left[\left(\frac{n}{a} \right)^2 + \left(\frac{m}{b} \right)^2 \right]^2.$	$a_{nm} = \frac{16q_0}{D\pi^6 mn} \left\{ \left[\left(\frac{n}{a} \right)^2 + \left(\frac{m}{b} \right)^2 \right]^2 - \frac{\gamma}{D} \right\}.$
Функция прогибов	
$W(x, y) = \frac{16q_0}{D\pi^6} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{m\pi}{b}y\right)}{mn \left[\left(\frac{n}{a} \right)^2 + \left(\frac{m}{b} \right)^2 \right]^2}.$	$W(x, y) = \frac{16q_0}{D\pi^6} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{m\pi}{b}y\right)}{mn \left\{ \left[\left(\frac{n}{a} \right)^2 + \left(\frac{m}{b} \right)^2 \right]^2 - \frac{\gamma}{D} \right\}}.$
Максимальный прогиб будет в центре пластинки (при $x=a/2, y=b/2$), $D = Eh^3/12(1 - \nu^2)$, здесь E – модуль деформаций 1-го рода; ν – коэффициент Пуассона; h – толщина пластины:	
$W_{\max} = \frac{192q_0}{\pi^6 Eh^3} (1 - \nu^2) \times$ $\times \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right)}{mn \left[\left(\frac{n}{a} \right)^2 + \left(\frac{m}{b} \right)^2 \right]^2}$	$W_{\max} = \frac{192q_0}{\pi^6 Eh^3} (1 - \nu^2) \times$ $\times \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right)}{mn \left\{ \left[\left(\frac{n}{a} \right)^2 + \left(\frac{m}{b} \right)^2 \right]^2 - \frac{\gamma(1 - \nu^2)}{Eh^3} \right\}}$

Для следящей нагрузки $\alpha^* = k^* \cdot \alpha$, где k^* – коэффициент приведения следящей нагрузки к равномерно распределенной:

$$k^* = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right)}{mn \left[n^2 + m^2 \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right]^2}}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \frac{\sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{2}\right)}{mn \left\{ \left[n^2 + m^2 \left(\frac{a}{b} \right)^2 \right]^2 - \frac{a^4 \gamma (1 - \nu^2)}{Eh^3} \right\}}}}. \quad (9)$$

Проведенные численные исследования показывают, что при загрузении железобетонных жестких плит указанным выше способом,

который приводит к возникновению следящей нагрузки, напряженно-деформированное состояние в большинстве случаев не слишком сильно отличается от плиты, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой (при больших пролетах и нагрузках разница может достигать 3-5%). Тем не менее, можно отметить основные факторы, которые влияют на разницу в прогибах и возникающих в плите напряжениях: толщина плиты, условия опирания, уровень нагружения, длина пролета, соотношение сторон для прямоугольной плиты. В некоторых случаях, например, для опертой шарнирно по краям плиты, можно аналитически определить область, в которой допустимо не учитывать следящий характер нагружения. В табл.3-12 приведены отклонения (в процентах) между прогибами плит, нагруженных равномерно распределенной нагрузкой и следящей. В расчетах варьируется толщина плиты h (10-30 см) и уровень нагружения q/q_0 (от 0 до 2), где q_0 – собственный вес конструкции.

На рис.12-21 показаны зоны, в которых необходимо учитывать следящий характер нагружения (темная часть диаграммы) и можно рассматривать его как равномерно распределенное (светлая часть диаграммы). Приведенные зависимости получены для квадратных плит железобетонных перекрытий с величиной пролета $l = 3 \div 12$ м.

Анализ полученных данных позволяет оценить влияние каждого из вышеперечисленных факторов на напряженно-деформированное состояние плит. Это дает возможность связать величину условно равномерно распределенной нагрузки и равномерной нагрузки соотношением

$$q_0^* = k_1 k_2 k_3 k_4 q_0, \quad (10)$$

где q_0^* – условно равномерно распределенная нагрузка, эквивалентная расчетной равномерной нагрузке; q_0 – расчетная равномерная нагрузка; k_1 – базовый коэффициент, который зависит от условия опирания железобетонной плиты. Для шарнирноопертой плиты $k_1=0,978$, для жесткозашемленной по всем сторонам соответствует коэффициент $k_1=0,989$. Если плита опирается на четыре колонны по ее углам, что соответствует расчетной схеме безбалочного перекрытия $k_1=0,986$; k_2 – коэффициент, который учитывает уровень расчетной нагрузки, и выбирается согласно графику, приведенному на рис.22. Здесь q_0/q_p – отношение расчетной нагрузки к удельному весу плиты; k_3 – коэффициент, учитывающий соотношение длины пролета l и толщины плиты h , и выбирается согласно графику, приведенному на рис.23; k_4 – коэффициент, который учитывает форму плиты и выби-

Таблица 3 (пролет 3 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0	0,010	0,015	0,023	0,034	0,051
0,5	0,018	0,027	0,041	0,061	0,091
1	0,032	0,049	0,073	0,109	0,164
1,5	0,058	0,087	0,131	0,197	0,295
2	0,105	0,157	0,236	0,354	0,531

Таблица 4 (пролет 4 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0	0,011	0,017	0,025	0,037	0,056
0,5	0,020	0,030	0,045	0,067	0,100
1	0,036	0,053	0,080	0,120	0,180
1,5	0,064	0,096	0,144	0,217	0,325
2	0,115	0,173	0,260	0,390	0,585

Таблица 5 (пролет 5 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0	0,013	0,020	0,029	0,044	0,066
0,5	0,023	0,035	0,053	0,079	0,118
1	0,042	0,063	0,095	0,142	0,213
1,5	0,076	0,114	0,171	0,256	0,384
2	0,136	0,205	0,307	0,614	0,691

Таблица 6 (пролет 6 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0	0,016	0,024	0,036	0,054	0,081
0,5	0,029	0,043	0,065	0,097	0,146
1	0,052	0,078	0,117	0,175	0,262
1,5	0,093	0,140	0,2104	0,315	0,472
2	0,168	0,252	0,378	0,567	0,850

Таблица 7 (пролет 7 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0	0,020	0,030	0,045	0,068	0,101
0,5	0,036	0,054	0,081	0,122	0,182
1	0,065	0,097	0,146	0,219	0,328
1,5	0,117	0,175	0,262	0,394	0,590
2	0,210	0,315	0,472	0,709	1,063

Таблица 8 (пролет 8 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0	0,025	0,038	0,056	0,084	0,127
0,5	0,045	0,068	0,101	0,152	0,228
1	0,081	0,122	0,182	0,273	0,410
1,5	0,146	0,219	0,328	0,492	0,738
2	0,262	0,394	0,590	0,886	1,329

Таблица 9 (пролет 9 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0	0,030	0,045	0,068	0,101	0,152
0,5	0,054	0,081	0,122	0,182	0,273
1	0,097	0,146	0,219	0,328	0,492
1,5	0,175	0,262	0,394	0,590	0,886
2	0,315	0,472	0,709	1,063	1,594

Таблица 10 (пролет 10 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0	0,040	0,060	0,090	0,135	0,203
0,5	0,072	0,108	0,162	0,243	0,365
1	0,130	0,194	0,292	0,437	0,656
1,5	0,233	0,350	0,525	0,787	1,181
2	0,420	0,630	0,945	1,417	2,126

Таблица 11 (пролет 11 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0	0,060	0,090	0,135	0,203	0,304
0,5	0,108	0,162	0,243	0,365	0,547
1	0,194	0,292	0,437	0,656	0,984
1,5	0,350	0,525	0,787	1,181	1,771
2	0,630	0,945	1,417	2,126	3,189

Таблица 12 (пролет 12 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0	0,080	0,120	0,180	0,270	0,405
0,5	0,144	0,216	0,324	0,486	0,729
1	0,259	0,389	0,583	0,875	1,312
1,5	0,467	0,700	1,050	1,575	2,362
2	0,840	1,260	1,890	2,834	4,252

рается согласно рис.24. Здесь a/b – отношение меньшей стороны к большей в прямоугольной плите.

Полученные результаты могут быть распространены и на другие системы, в частности, оболочки. Исходя из этого рассмотрим процедуру формирования разрешающих уравнений и решения для стандартного и следающего нагружений подобных конструктивов.

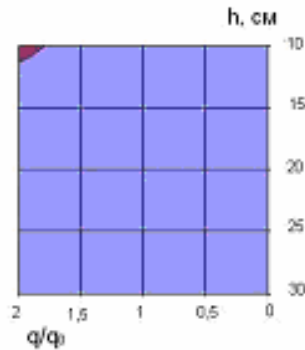


Рис.12 – Зона, в которой необходимо учитывать следающий характер нагружения при $l=3$ м

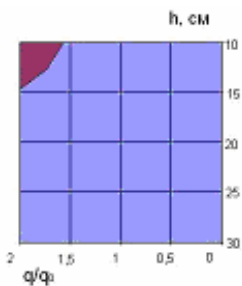


Рис.13 – Зона, в которой необходимо учитывать следающий характер нагружения при $l=4$ м

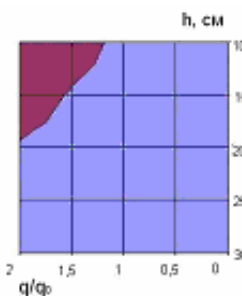


Рис.14 – Зона, в которой необходимо учитывать следающий характер нагружения при $l=5$ м

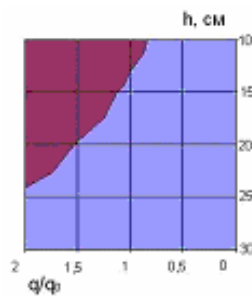


Рис.15 – Зона, в которой необходимо учитывать следающий характер нагружения при $l=6$ м

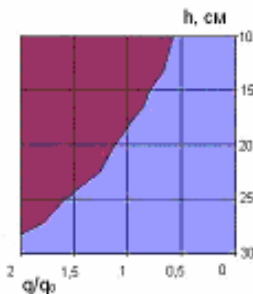


Рис.16 – Зона, в которой необходимо учитывать следающий характер нагружения при $l=7$ м

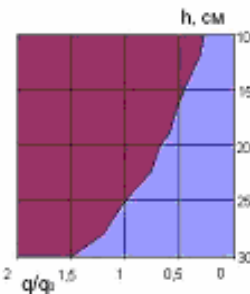


Рис.17 – Зона, в которой необходимо учитывать следающий характер нагружения при $l=8$ м

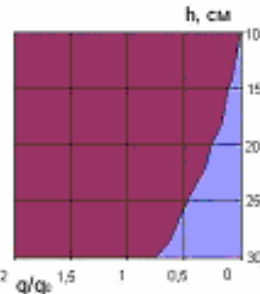


Рис.18 – Зона, в которой необходимо учитывать следающий характер нагружения при $l=9$ м

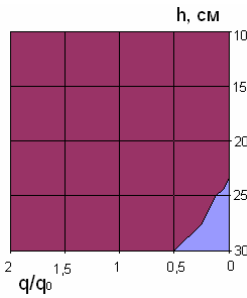


Рис.19 – Зона, в которой необходимо учитывать следящий характер нагружения при $l=10$ м

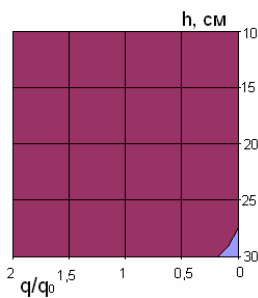


Рис.20 – Зона, в которой необходимо учитывать следящий характер нагружения при $l=11$ м

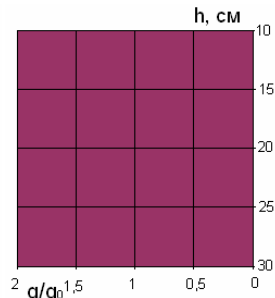


Рис.21 – Зона, в которой необходимо учитывать следящий характер нагружения при $l=12$ м

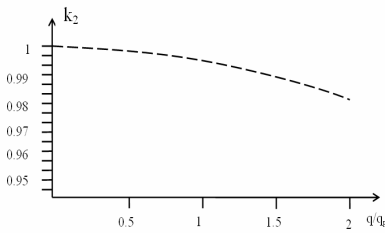


Рис.22 – Коэффициент, учитывающий уровень нагрузки

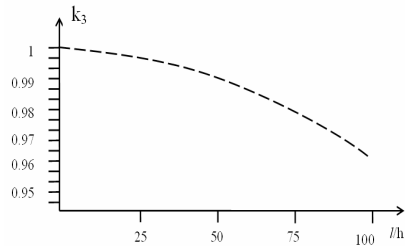


Рис.23 – Коэффициент, учитывающий соотношение длины пролета и толщины

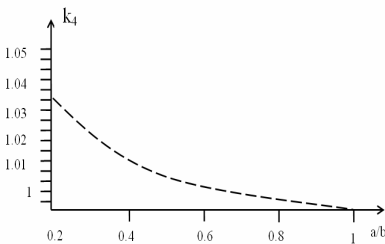


Рис.24 – Коэффициент, учитывающий форму плиты

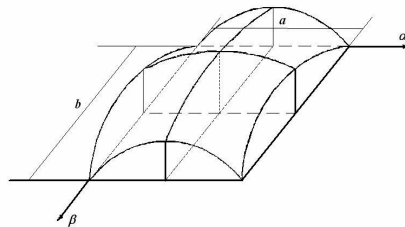


Рис.25 – Пологая оболочка

Как показано в [6], система уравнений теории оболочек большого прогиба имеет вид:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^5 L_i + q(\alpha\beta) = 0; \\ \sum_{i=1}^5 L_{5+i} = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где

$$L_1 = \frac{f^2 h^3}{3(4f-1)} E(\alpha\beta) \nabla^2 \nabla^2 W$$

$$L_2 = \frac{2f^2 h^3}{3(4f-1)} \left[\frac{\partial E(\alpha_i\beta)}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha} \nabla^2 W + \frac{\partial E(\alpha_i\beta)}{\partial \beta} \cdot \frac{\partial}{\partial \beta} \nabla^2 W \right]$$

$$L_3 = \frac{f^2 h^3}{3(4f-1)} \left[\frac{\partial^2 W}{\partial \alpha^2} \left(\frac{\partial^2 E(\alpha_i\beta)}{\partial \alpha^2} + \frac{1-2f}{2f} \frac{\partial^2 E(\alpha_i\beta)}{\partial \beta^2} \right) + \frac{4f-1}{f} \cdot \frac{\partial E(\alpha_i\beta)}{\partial \alpha \partial \beta} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha \partial \beta} + \right. \\ \left. \frac{\partial^2 W}{\partial \beta^2} \left(\frac{\partial^2 E(\alpha_i\beta)}{\partial \beta^2} + \frac{1-2f}{2f} \frac{\partial^2 E(\alpha_i\beta)}{\partial \alpha^2} \right) \right]$$

$$L_4 = - \left(k_\alpha \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \varphi^2} + k_\beta \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \varphi^2} \right)$$

$$L_5 = 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha \partial \beta} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha \partial \beta} - \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \beta^2} - \frac{\partial^2 W}{\partial \beta^2} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2}$$

$$L_6 = \frac{2}{h} \cdot \frac{1}{E^3(\alpha_i\beta)} \left\{ \left[\frac{\partial E(\alpha_i\beta)}{\partial \alpha} \right]^2 \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} - \frac{1-2f}{2f} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \beta^2} \right) + \frac{1}{f} \left[\frac{\partial E(\alpha_i\beta)}{\partial \alpha} \right] \left[\frac{\partial E(\alpha_i\beta)}{\partial \beta} \right] \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha \partial \beta} \right. \\ \left. + \left[\frac{\partial E(\alpha_i\beta)}{\partial \beta} \right]^2 \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \beta^2} - \frac{1-2f}{2f} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} \right) \right\}$$

$$L_7 = \frac{1}{h} \cdot \frac{1}{E^2(\alpha_i\beta)} \left\{ \frac{\partial^2 E(\alpha_i\beta)}{\partial \alpha^2} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} - \frac{1-2f}{2f} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \beta^2} \right) + \frac{1}{f} \cdot \frac{\partial^2 E(\alpha_i\beta)}{\partial \alpha \partial \beta} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha \partial \beta} \right. \\ \left. + \frac{\partial^2 E(\alpha_i\beta)}{\partial \beta^2} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \beta^2} - \frac{1-2f}{2f} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} \right) \right\}$$

$$L_8 = -\frac{2}{h} \cdot \frac{1}{E^2(\alpha_i\beta)} \left[\frac{\partial E(\alpha_i\beta)}{\partial \alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha} \nabla^2 \varphi + \frac{\partial E(\alpha_i\beta)}{\partial \beta} \cdot \frac{\partial}{\partial \beta} \nabla^2 \varphi \right]$$

$$L_9 = \frac{1}{h} \cdot \frac{1}{E(\alpha_i\beta)} \nabla^2 \nabla^2 \varphi$$

$$L_{10} = - \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \alpha \partial \beta} \right)^2 + k_\alpha \frac{\partial^2 W}{\partial \beta^2} + k_\beta \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha^2} \cdot \frac{\partial^2 W}{\partial \beta^2},$$

$W(\alpha_i\beta)$ – прогиб; $\varphi(\alpha_i\beta)$ – функция напряжений; h – толщина оболочки; f – упругая постоянная, связывающая модули деформации 1-го

и 2-го рода, в случае упругого изотропного тела $f = \frac{1}{2(1+\nu)}$; ν – коэффициент Пуассона; $k\alpha, k\beta$ – кривизны оболочки в направлении осей " α " " β " соответственно; α, β – координаты триортогональной системы,

$$E(\alpha, \beta) = E_1 + E_2\alpha + E_3\beta + E_4\alpha\beta + E_5\alpha^2 + E_6\beta^2. \quad (12)$$

Здесь $E_L (1 \leq L \leq 6)$ – постоянные, определяемые из условия минимума квадратичных отклонений значений модулей деформаций, полученных в отдельных точках области, от вычисляемых по (12).

Решение системы (11) разыскивается приближенно методом Бубнова-Галеркина в виде:

$$\begin{aligned} W &= P_{11}U_1, \\ \varphi &= D_{11}\nu_1, \end{aligned} \quad (13)$$

где P_{11} и D_{11} – неизвестные постоянные; $U_1 = V_1 = \sin \frac{\pi\alpha}{a} \sin \frac{\pi\beta}{b}$ – базисные функции; a, b – размеры оболочки в плане (рис.3).

Выбор базисных функций производится из условия контурного шарнирного опирания конструкции.

Напряжения на основании (13) определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha &= \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \beta^2}, \\ \sigma_\beta &= \frac{1}{h} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2}, \\ \tau_{\alpha\beta} &= -\frac{1}{h} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha \partial \beta}. \end{aligned} \quad (14)$$

В результате применения процедуры Бубнова-Галеркина к (11) с учетом (13) имеем

$$\begin{aligned} q^* &= \frac{\pi^6 f^6}{48(4f-1)} \left[\left(1 + \frac{1}{\gamma^2} \right)^2 \Omega_3 + \frac{2(1+\gamma^2)}{\pi^2 \gamma^4} \Omega_4 - \frac{2}{\pi^2} \Omega_5 \right] \xi + \frac{\pi^4}{16} \times \\ &\times \frac{(x_\alpha + x_\beta)^2}{2\gamma^2 \Omega_1 + \pi^2 (1+\gamma^2)^2 \Omega_2} \xi - \frac{\pi^4 (x_\alpha + x_\beta)}{2\gamma^2 \Omega_1 + \pi^2 (1+\gamma^2) \Omega_2} \xi^2 + \end{aligned}$$

$$+ \frac{32\pi^4}{9} \cdot \frac{1}{2\gamma^2\Omega_1 + \pi^2(1+\gamma^2)\Omega_2} \xi^3, \quad (15)$$

где q^* – безразмерный параметр нагрузки; ξ – безразмерный параметр прогиба; $X_\alpha = \frac{k_\alpha a^2}{h}$, $X_\beta = \frac{k_\beta b^2}{h}$ – безразмерные параметры кривиз-

ны; $\gamma = \frac{a}{b}$ – соотношение сторон оболочки;

$\Omega_k(E_L)$ [$1 \leq k \leq 5$; $1 \leq L \leq 6$] – функции в частном случае

$E(\alpha_1\beta) = E = \text{const}$; $\Omega_1 = 0$; $\Omega_2 = 1$; $\Omega_3 = 1$; $\Omega_4 = 0$; $\Omega_5 = 0$,

получаем известное решение [6].

На первом шаге итераций для определения зависимости «нагрузка-прогиб» полагаем:

$$E_1 = E_0 \text{ и } E_L = 0 \quad (2 \leq L \leq 6), \quad (16)$$

где E_0 – начальный модуль деформаций материала оболочки.

Из уравнения $\frac{dq^*}{d\xi} = 0$ определяем верхнее и нижнее критиче-

ские значения параметра прогиба

$$\xi_{1,2} = \frac{3}{32}(x_\alpha + x_\beta) \pm \frac{1}{32} \sqrt{3(x_\alpha + x_\beta)^2 - \frac{2\pi^2 f^2}{4f-1} \left[\left(1 + \frac{1}{\gamma^2}\right)^2 \Omega_3 + \frac{2(1+\gamma^2)}{x^2 \gamma^4} \Omega_4 - \frac{2}{\pi^2} \Omega_5 \right]} \times \\ \times \sqrt{[2\gamma^2\Omega_1 + \pi^2(1+\gamma^2)^2\Omega_2]}. \quad (17)$$

Оболочки, для которых при расчетах под радикалом в (17) получается отрицательное выражение, следует отнести к пластинам или вспарушенным панелям (рис.26). Аналогично работают и оболочки отрицательной гауссовой кривизны. При равенстве нулю подкоренного выражения в (17), имеем случай конструкций, являющихся граничными между пластинами и оболочками, а при положительной определенности радикала – случай пологих оболочек. После нахождения безразмерного параметра прогиба определяются постоянные P_{11} и D_{11} в (13). Далее по формулам теории пластичности определяем интенсивность напряжений и деформаций для плоской задачи:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_\alpha^2 - \sigma_\alpha \sigma_\beta + \sigma_\beta^2 + 3\tau_{\alpha\beta}^2}; \\ \varepsilon_i = \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_\alpha^2 + \varepsilon_\alpha \varepsilon_\beta + \varepsilon_\beta^2 + \frac{1}{4} \gamma_{\alpha\beta}^2}, \quad (18)$$

где σ_i – интенсивность напряжений; ε_i – интенсивность деформаций; $\sigma_\alpha, \sigma_\beta, \tau_{\alpha\beta}$ – нормальные и касательные напряжения; $\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta, \gamma_{\alpha\beta}$ – осевые деформации и деформация сдвига.

При этом модуль деформаций определяется по формуле

$$E_n^{*(j)} = \frac{\frac{\sigma_i^{(j)}}{\varepsilon_i^{(j)}}}{1 + \frac{3f-1}{3fE_{n-1}^{*(j)}} \frac{\sigma_i^{(j)}}{\varepsilon_i^{(j)}}}, \quad (18a)$$

где $E_n^{*(j)}$ – величина модуля деформаций в точке j на n -м шаге итераций.

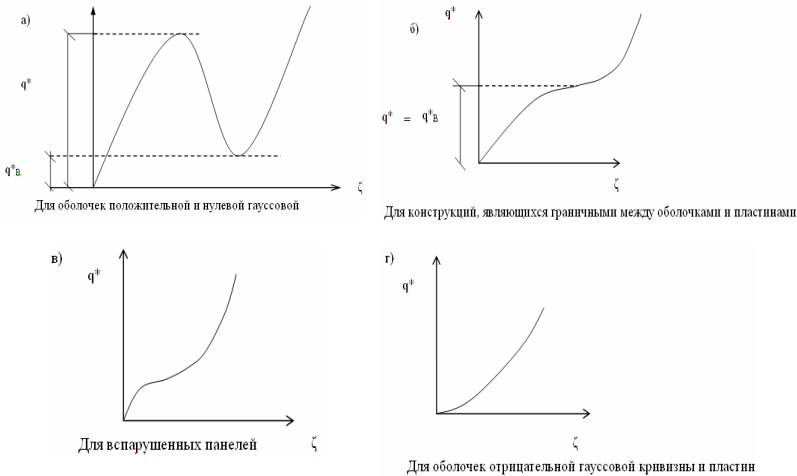


Рис.26 – Возможные виды зависимости «нагрузка - прогиб», получаемые при расчетах для упругих оболочек большого прогиба [6]

Получив величины модулей деформаций в различных точках области, строится аппроксимирующий полином (в смысле квадратичных приближений) в виде полного уравнения поверхности второго порядка. Эта процедура приводит к необходимости решения на каждом шаге итераций матричного уравнения

$$S \times E = K, \quad (19)$$

где S – квадратная матрица 6-го порядка (матрица координат)

$$S = \begin{vmatrix} m \sum_1^m \alpha_j \sum_1^m \beta_j \sum_1^m \alpha_j \beta_j \sum_1^m \alpha_j^2 \sum_1^m \beta_j^2 \\ \sum_1^m \alpha_j \sum_1^m \alpha_j^2 \sum_1^m \alpha_j^2 \beta_j \sum_1^m \alpha_j^2 \beta_j \sum_1^m \alpha_j^3 \sum_1^m \alpha_j \beta_j^2 \\ \sum_1^m \beta_j \sum_1^m \alpha_j \beta_j \sum_1^m \beta_j^2 \sum_1^m \alpha_j \beta_j^2 \sum_1^m \alpha_j^2 \beta_j \sum_1^m \beta_j^3 \\ \sum_1^m \alpha_j \beta_j \sum_1^m \alpha_j^2 \beta_j \sum_1^m \alpha_j \beta_j^2 \sum_1^m \alpha_j^2 \beta_j^2 \sum_1^m \alpha_j^3 \beta_j \sum_1^m \alpha_j \beta_j^3 \\ \sum_1^m \alpha_j^2 \sum_1^m \alpha_j^3 \sum_1^m \alpha_j^2 \beta_j \sum_1^m \alpha_j^3 \beta_j \sum_1^m \alpha_j^4 \sum_1^m \alpha_j^2 \beta_j^2 \\ \sum_1^m \beta_j^2 \sum_1^m \alpha_j \beta_j^2 \sum_1^m \beta_j^3 \sum_1^m \alpha_j \beta_j^3 \sum_1^m \alpha_j^2 \beta_j^2 \sum_1^m \beta_j^4 \end{vmatrix}; \quad E = \begin{vmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \\ E_5 \\ E_5 \end{vmatrix} - \text{матрица-}$$

столбец неизвестных;

$$K = \begin{vmatrix} \sum_1^m E_j \\ \sum_1^m E_j \alpha_j \\ \sum_1^m E_j \beta_j \\ \sum_1^m E_j \alpha_j \beta_j \\ \sum_1^m E_j \alpha_j^2 \\ \sum_1^m E_j \beta_j^2 \end{vmatrix} - \text{матрица-столбец правых частей уравнения (19).}$$

Здесь m – число точек.

Итерационный процесс продолжается до тех пор, пока не будет выполнено неравенство

$$\int_{\Omega} E_{n-1}(\alpha, \beta) d\Omega - \int_{\Omega} E_n(\alpha, \beta) d\Omega \leq \delta, \quad (20)$$

δ – известная постоянная.

В случае задачи об оценке напряженно деформированного состояния оболочки выражение (15) преобразовывается к кубическому уравнению, которое затем решается точно с использованием формул

Кардана и гиперbolo-тригонометрических подстановок.

Рассмотрим далее деформирование тонких оболочек двоякой гауссовой кривизны (в общем случае), нагруженных водой. В нагруженном состоянии на оболочку кроме собственного веса будет действовать давление воды. Для недеформированной оболочки давление воды будет меняться согласно ее очертанию. Кроме того, появится дополнительное давление, связанное с перемещением точек на поверхности оболочки, то есть, как и при изгибе пластин проявится следящий характер нагружения. Рассмотрим величину и способы учета дополнительных слагаемых для прямоугольных в плане оболочек (с размерами a по оси α и b по оси β , приняв начало глобальной системы координат в углу основания оболочек) и считая, что вода полностью их покрывает.

Давление жидкости направлено по нормали к поверхности тела. Величина его, с учетом неизменной плотности, будет зависеть от высоты столба воды в каждой точке. За начало отсчета примем максимальный уровень воды (H), т.е. для нижних точек наружной поверхности, на остальных участках нагруженной поверхности он будет меньше:

$$H(Z) = H - z, \quad (21)$$

где z – координата, перпендикулярная основанию.

Далее рассмотрим величину дополнительного давления, вызванного перемещением точек на поверхности оболочки. Решение задачи изгиба тонких оболочек дает вектор перемещений точек срединной поверхности в криволинейной системе координат: $\bar{U}(U, V, W)$, где U и V – компоненты перемещений точки в массиве оболочки в направлении α и β соответственно; W – по нормали к поверхности оболочки (направление z). Вектор перемещений в глобальной системе координат: $\bar{U}(U_\alpha, U_\beta, U_z)$. Уровень давления воды будет меняться на величину, пропорциональную перемещению точки в вертикальном направлении U_z . Связь между компонентами вектора перемещений в локальной (криволинейной) и глобальной системах координат можно получить, используя преобразование:

$$(U_\alpha, U_\beta, U_z) = [J] \cdot (U, V, W),$$

где $[J]$ – матрица поворота, коэффициенты которой равны косинусам между осями локальной и глобальной систем координат, тогда:

$$U_z = U \cos(k_\alpha \wedge Z) + V \cos(k_\beta \wedge Z) + W \cos(n \wedge Z), \quad (22)$$

где k_α , k_β – касательные к оболочке в направлении α и β соответ-

ственно; n – нормаль к поверхности.

С учетом вышесказанного давление воды в произвольной точке деформируемой оболочки будет:

$$p_B = \gamma (H - Z + U_z). \quad (23)$$

Для оболочек, в отличие от пластин, нельзя аналитически определить область, в которой допустимо не учитывать следящий характер нагружения. В этом случае только численно определяется коэффициент приведения неравномерно распределенной следящей нагрузки к равномерно распределенной:

$$q_0^* = k^* q_0. \quad (24)$$

Рассмотрим деформирование квадратной в плане оболочки ($a=b=l$) нулевой гауссовой кривизны (рис.27). Распределенная нагрузка

$$q(\alpha, \beta) = q_0' + q_0'' \left(1 - \sin \left(\frac{\pi \beta}{b} \right) \right), \text{ где } q_0' - \text{неизменяющаяся часть на-}$$

грузки, q_0'' – давление воды, изменение которого обусловлено формой поверхности, а именно $q_0 = q_0' + q_0''$ (21). В табл.13-17 даны коэффициенты приведения следующей нагрузки k^* (24) к равномерно распределенной. В расчетах варьируется толщина оболочки h (10-30 см), уровень нагружения в нижней точке q_0/q_k (от 0,5 до 2), где q_k – собственный вес конструкции, высота подъема принята $f = 0,076 \cdot l$.

Таблица 13 (пролет 8 м)

Уровень нагружения q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,698	0,697	0,696	0,694	0,691
1	0,697	0,695	0,693	0,689	0,684
1,5	0,694	0,691	0,687	0,680	0,670
2	0,690	0,684	0,676	0,665	0,647

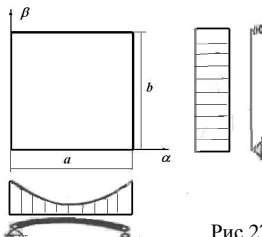


Рис.27

Таблица 14 (пролет 9 м)

Уровень нагружения q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,697	0,696	0,694	0,691	0,686
1	0,695	0,693	0,689	0,684	0,675
1,5	0,691	0,687	0,680	0,670	0,656
2	0,684	0,676	0,665	0,647	0,620

Таблица 15 (пролет 10 м)

Уровень нагружения q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,696	0,695	0,692	0,688	0,682
1	0,694	0,690	0,685	0,678	0,667
1,5	0,688	0,683	0,674	0,661	0,641
2	0,679	0,669	0,653	0,629	0,594

Таблица 16 (пролет 11 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,696	0,693	0,690	0,685	0,677
1	0,692	0,688	0,682	0,673	0,659
1,5	0,685	0,678	0,667	0,651	0,626
2	0,674	0,661	0,641	0,611	0,567

Таблица 17 (пролет 12 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,695	0,692	0,688	0,682	0,673
1	0,690	0,685	0,678	0,667	0,651
1,5	0,683	0,674	0,661	0,641	0,611
2	0,669	0,653	0,629	0,594	0,541

Рассмотрим далее деформирование квадратной в плане оболочки ($a=b=l$) двоякой гауссовой кривизны эллиптического типа, распределение нагрузки без учета деформирования на которую (рис.28):

$$q(\alpha, \beta) = q_0' + q_0'' \left(1 - \sin \left(\frac{\pi \alpha}{a} \right) \right) \left(1 - \sin \left(\frac{\pi \beta}{b} \right) \right), \text{ где } q_0' - \text{ неизменяю-}$$

щаяся часть нагрузки; q_0'' – давление воды, изменение которого обусловлено формой поверхности (21). В расчетах варьируется толщина оболочки h (10-30 см), уровень нагружения q_0/q_k (от 0,5 до 2), где q_k – собственный вес конструкции, высота подъема $f = 0,123 \cdot l$. В табл.18-22 даны коэффициенты приведения k^* (24) равномерно распределенной нагрузкой к заданной.

Таблица 18 (пролет 8 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,618	0,617	0,616	0,614	0,611
1	0,617	0,615	0,613	0,609	0,604
1,5	0,614	0,611	0,607	0,600	0,590
2	0,610	0,604	0,596	0,585	0,567

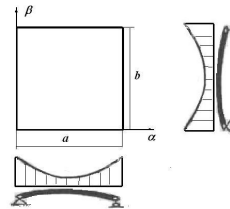


Рис.28

Таблица 19 (пролет 9 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,618	0,617	0,615	0,613	0,609
1	0,616	0,614	0,611	0,607	0,600
1,5	0,613	0,610	0,604	0,596	0,585
2	0,607	0,601	0,592	0,577	0,556

Таблица 20 (пролет 10 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,617	0,616	0,614	0,611	0,607
1	0,615	0,613	0,610	0,605	0,597
1,5	0,612	0,608	0,602	0,592	0,579
2	0,605	0,598	0,587	0,570	0,546

Таблица 21 (пролет 11 м)

Уровень нагружения q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,617	0,616	0,614	0,610	0,605
1	0,615	0,612	0,608	0,603	0,594
1,5	0,611	0,606	0,599	0,589	0,573
2	0,603	0,595	0,582	0,563	0,535

Таблица 22 (пролет 12 м)

Уровень нагружения q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,617	0,615	0,613	0,609	0,604
1	0,614	0,611	0,607	0,600	0,590
1,5	0,610	0,604	0,596	0,585	0,567
2	0,601	0,592	0,577	0,556	0,524

Рассмотрим деформирование квадратной в плане оболочки ($a=b=l$) двойкой гауссовой кривизны параболического типа, распределение нагрузки без учета деформирования (рис.29):

$$q(\alpha, \beta) = q_0' + \frac{16q_0''}{a^2b^2} \left(\alpha - \frac{a}{2} \right)^2 \left(\beta - \frac{b}{2} \right)^2, \text{ где } q_0' - \text{неизменяющаяся часть}$$

нагрузки; q_0'' – давление воды, изменение которого обусловлено формой поверхности (21). В табл.23-27 даны коэффициенты приведения k^* (24) равномерно распределенной нагрузкой к заданной. В расчетах варьируется толщина оболочки h (10-30 см), уровень нагружения q_0/q_k (от 0,5 до 2), где q_k – собственный вес конструкции, высота подъема $f=0,106 \cdot l$.

Таблица 23 (пролет 8 м)

Уровень нагружения	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,668	0,667	0,666	0,664	0,661
1	0,667	0,665	0,663	0,659	0,654
1,5	0,664	0,661	0,657	0,650	0,640
2	0,660	0,654	0,646	0,635	0,617

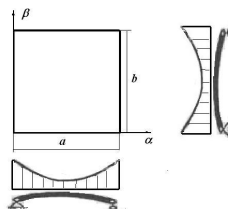


Рис.29

Таблица 24 (пролет 9 м)

Уровень нагружения q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,668	0,667	0,665	0,663	0,659
1	0,666	0,664	0,661	0,657	0,650
1,5	0,663	0,660	0,654	0,646	0,635
2	0,657	0,651	0,642	0,627	0,606

Таблица 25 (пролет 10 м)

Уровень нагружения q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,667	0,666	0,664	0,661	0,657
1	0,665	0,663	0,660	0,655	0,647
1,5	0,662	0,658	0,652	0,642	0,629
2	0,655	0,648	0,637	0,620	0,596

Таблица 26 (пролет 11 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,667	0,666	0,664	0,660	0,655
1	0,665	0,662	0,658	0,653	0,644
1,5	0,661	0,656	0,649	0,639	0,623
2	0,653	0,645	0,632	0,613	0,585

Таблица 27 (пролет 12 м)

Уровень нагрузки q_0/q_k	Толщина оболочки, см				
	30	25	20	15	10
0,5	0,667	0,665	0,663	0,659	0,654
1	0,664	0,661	0,657	0,650	0,640
1,5	0,660	0,654	0,646	0,635	0,617
2	0,651	0,642	0,627	0,606	0,574

Описанный метод в совокупности с алгоритмами оценки точности нагружения открывает широкие возможности внедрения современных подсистем АСНИ в строительную практику.

1. Пристрій для натурних випробувань плит і оболонок. Патент на корисну модель № 44125. Україна. 2009.

2. Беседин Г.М., Манько С.П., Наконечный Ю.Е., Фурсов В.В., Шмуклер В.С. Исследование структурного покрытия с элементами из холодногнутых профилей // Легкие строительные конструкции покрытий зданий: Межвуз. сб. – Ростов-на-Дону, 1976. – С.114-121.

3. Тетиор А.Н., Померанец В.Н. Обследование и испытание сооружений. – К.: Вища. шк., 1989. – 209 с.

4. Шмуклер В.С., Климов Ю.А., Бурак Н.П. Каркасные системы облегченного типа. – Харьков: Золотые страницы, 2008. – 336 с.

5. Шутенко Л.Н., Засядько Н.А., Чупрынин А.А. Основы теории упругости и пластичности. – Харьков: ХНАГХ, 2007. – 135 с.

6. Бондаренко В.М., Шагин А.Л., Шмуклер В.С. Комплекс программ для расчёта опёртых по контуру пологих оболочек с учётом физической и геометрической нелинейности. – М.: ОФАП Госстрой СССР, 1975. – 109 с.

Получено 26.11.2009

УДК 624.012.44 : 620.17

В.Н.РУДАКОВ, канд. техн. наук, Г.А.МОЛОДЧЕНКО, д-р техн. наук,
Д.В.АБРАКИТОВ

Харьковская национальная академия городского хозяйства

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРОЧНЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОГО (ТЯЖЕЛОГО) БЕТОНА ПРИ ОСЕВОМ МЕСТНОМ СЖАТИИ

На основе обобщения физики процесса упрочнения тяжелого бетона при местном сжатии, достаточно хорошо изученного экспериментально за последние 80 лет, предлагается физическая модель и методика количественного определения коэффициента упрочнения ϕ_b конструкционного бетона при осевом местном сжатии в рамках разработанной В.Н.Рудаковым теории скольжения микрополяризованной среды для простого статического нагружения.

На основі узагальнення фізики процесу зміцнення важкого бетону при місцевому стиску, досить добре вивченого експериментально за останні 80 років, пропонується фізична модель і методика кількісного визначення коефіцієнта зміцнення ϕ_b конструк-