

## НЕЛИНЕЙНЫЙ РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПОКРЫТИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

*Р. В. КУМАШОВ*

*ОДО «ЭНЭКА» г. Минск, Республика Беларусь*

Вопросам статических расчетов плит на линейно-упругих основаниях посвящены публикации Н. М. Герсевича, Ж. Буссинеска, Б. Н. Жемочкина, М. И. Горбунова-Посадова, С. В. Босакова, А. П. Синицына, И. А. Симвулиди, С. Д. Семенюка и др. Ряд работ посвящен проблеме расчета ортотропных и анизотропных пластинок. Над данным направлением работали такие ученые, как С. Н. Клепиков, С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер, В. И. Соломин, А. Р. Ржаницын, С. Г. Лехницкий и др. Однако ни одна из предложенных методик не рассматривает физическую нелинейность плит на упругом основании. В частности, не разработана методика расчета прямоугольных плит с трещинами на упругом основании. В некоторых работах описаны только предпосылки и допущения, которые могут поспособствовать разработке данной методики.

В данной работе предложена методика расчета физически нелинейных плит на линейно-упругом однородном основании, которая основывается на способе Б. Н. Жемочкина. Этот подход позволяет полностью найти напряженно-деформированное состояние, внутренние усилия и осадки плиты. Также данная методика позволяет установить область трещин в плите [1].

Прямоугольная физически нелинейная анизотропная неоднородная плита на линейно-упругом однородном основании находится под действием вертикальной внешней нагрузки. Параметры плиты: длина  $b$ , ширина  $a$ , высота  $h$ , жесткости в различных направлениях  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{21}$ ,  $D_{22}$ ,  $D_{33}$ . Физическая нелинейность обусловлена нелинейностью материала плит. Анизотропия и неоднородность плиты обусловлена образованием трещин в плите от действия произвольной нагрузки.

Линейно-упругое однородное основание моделируется, как для линейно-упругого полупространства с постоянным модулем упругости (деформации) этого пространства  $E_0$ . Коэффициент Пуассона упругого пространства  $\nu_0$  принимается постоянным.

Плита в плане разбивается на  $m \times n$  участков Б. Н. Жемочкина. В свою очередь каждый участок Б. Н. Жемочкина по высоте разбивается на  $k$  элементарных слоев. За неизвестные принимаем  $R_i(x, y)$  – реактивные усилия в связи  $i$ -го участка Б. Н. Жемочкина. Считается, что на контакте плиты с упругим основанием возникают только нормальные реактивные давления, силами трения пренебрегаем. Для плиты справедливы гипотезы теории изгиба; в контактной зоне справедливо равенство осадок основания прогибам плиты.

В свою очередь, сечение участка Б. Н. Жемочкина рассматривается как совокупность элементарных площадок, в пределах которых деформации считаются равномерно распределенными, а по высоте сечения элемента связаны гипотезой плоских сечений.

Расчет прочности сечений железобетонных элементов производится из условий равновесия, гипотезы плоских сечений и диаграмм деформирования бетона и арматуры.

Алгоритм определения несущей способности железобетонных элементов по нормальному сечению предусматривает шаговый метод последовательных нагружений, на каждом этапе которого реализован итерационный процесс вычисления относительных деформаций в элементарных площадках. Максимальное усилие от внешней нагрузки, при котором процесс последовательных приближений сходится (соблюдаются условия равновесия), соответствуют несущей способности железобетонного элемента [2].

На первой итерации (упругий расчет) при заданном усилии от внешней нагрузки задается положение центра изгиба сечения плиты в предположении упругой работы бетона и арматуры.

Определяются жесткости плиты и составляются канонические уравнения смешанного метода, выражающие условия совместности деформаций плиты и упругого основания. К этим уравнениям добавляются уравнения равновесия [3, 4].

После решения системы канонических уравнений по найденным значениям реактивных усилий  $R_k$  находятся реактивное давление под плитой и распределение осадок  $S_k$ .

Коэффициенты при неизвестных усилиях в связях в системе зависят от прогибов плиты в основной системе смешанного метода и осадок упругого основания.

В соответствии с методом Ритца – Тимошенко прогибы срединной поверхности плиты с защемленной в начале координат нормалью от действия единичной сосредоточенной силы будем искать в виде конечного ряда по первым пяти частным решениям Клебша [5]:

$$W(x, y) = C_{00} \left[ \left( \frac{x}{b} \right)^2 + \left( \frac{y}{a} \right)^2 \right] + C_{01} \left[ \left( \frac{x}{b} \right)^4 + \left( \frac{y}{a} \right)^4 \right] + C_{02} \frac{2xy}{ba} \cdot \left[ \left( \frac{x}{b} \right)^2 + \left( \frac{y}{a} \right)^2 \right] + C_{03} \frac{x}{b} \cdot \left[ \left( \frac{x}{b} \right)^2 - 3 \left( \frac{y}{a} \right)^2 \right] + C_{04} \frac{y}{a} \left[ 3 \left( \frac{x}{b} \right)^2 - \left( \frac{y}{a} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $C_{00}, C_{01}, C_{02}, C_{03}, C_{04}$  – неопределённые коэффициенты;  $a, b$  – полуширина плиты в направлении  $y$  и  $x$  соответственно.

При перемещении точки поверхности упругого полупространства при загрузении участка прямоугольной формы на этой поверхности равномерно распределенной нагрузкой с равнодействующей, равной 1, интеграл после вычисления имеет вид, представленный в работе [3, формула (3.3)].

По значению осадок плиты определяются кривизна нейтральной поверхности плиты в двух взаимно перпендикулярных направлениях, относительное кручение, главные радиусы кривизны и относительные деформации в каждой элементарной площадке участка Б. Н. Жемочкина. Далее по диаграмме деформирования бетона с учетом найденных относительных деформаций находим напряжения и секущие модули деформации в каждом элементарном слое, а также уточнением положение центра изгиба сечения плиты.

Если напряжения растяжения в бетоне элементарной площадки превышают предельные значения, это свидетельствует об образовании трещины в этой площадке. В дальнейших расчетах осевые жесткости этой элементарной площадки принимаются равными нулю.

Найденные новые секущие модули деформаций вводятся в расчет в новом расчетном цикле, в котором уточняются положение нейтральной поверхности плиты, жесткости и осадки плиты. Критерием окончания процесса последовательных приближений является сравнение осадок и главных радиусов кривизны на смежных этапах.

После окончания итерационного процесса в результате решения системы канонических уравнений по найденным значениям реактивных усилий находятся окончательные значения реактивного давления под плитой и распределение осадок. Тогда по известной кривизне плиты определяем изгибающие и крутящие моменты, действующие в сечении плиты от заданных нагрузок.

Разработанная методика расчета физически нелинейных плит на линейно-упругом однородном основании, основанная на способе Б. Н. Жемочкина, позволяет полностью найти напряженно-деформированное состояние, внутренние усилия и осадки плиты.

#### Список литературы

- 1 **Жемочкин, Б. Н.** Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. Н. Жемочкин, А. П. Синицын. – М. : Госстройиздат, 1962. – 240 с.
- 2 Усиление железобетонных конструкций. Пособие П1-98 к СНиП 2.03.01-84\*. – Минск : Минстройархитектуры, 1998. – 189 с.
- 3 **Босаков, С. В.** Статические расчеты плит на упругом основании / С. В. Босаков. – Минск : БНТУ, 2002. – 128 с.
- 4 **Семенов, С. Д.** Экспериментальные исследования осадок железобетонных плит покрытого автомобильных дорог и оценка точности расчетной методики / С. Д. Семенов, Р. В. Кумашов // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол. : О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2020. – Вып. 12. – С. 185–208.
- 5 **Тимошенко, С. П.** Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М. : Физ.-мат. изд-во, 1963. – 536 с.