

**СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА ПЛОСКИХ
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЯ
НА ПРОДАВЛИВАНИЕ ПО ТКП EN 1992-1-1-2009
И FIB MODEL CODE 2010**

Глуховский А.Г., магистрант, Рак Н.А., канд. техн. наук, доцент (БНТУ)

Аннотация. Рассмотрены основные положения сравнительно новой физической модели расчета плоских плит перекрытий на продавливание, включенной в нормы *fib Model Code 2010* [1] и планируемой к включению в новую редакцию Eurocode 2. Проведено сопоставление этой модели с полуэмпирической моделью, положенной в основу методики расчета плит на продавливание в действующих нормах по расчету железобетонных конструкций ТКП EN 1992-1-1-2009 [2].

Существующие нормативные документы различных стран, регламентируя необходимость обеспечения прочности узлов сопряжение плоских железобетонных плит безбалочных перекрытий с колонной, сводят все расчетные зависимости к простым полуэмпирическим формулам, полученным на основе анализа результатов экспериментальных данных. Такая полуэмпирическая модель заложена в методику расчета плит на продавливание в действующих нормах по расчету железобетонных конструкций ТКП EN 1992-1-1-2009 [2]. В основу модели положена гипотеза о разрушении плит по некоторым предельным поверхностям с прямолинейной образующей и заданным углом наклона этой образующей к срединной плоскости плиты, так называемом “конусе” или “пирамиде продавливания”. Реальная форма поверхности разрушения плиты над колонной (штампом) имеет значительно более сложный вид и, формируясь и видоизменяясь в процессе нагружения, зависит от многих факторов.

На основании анализа результатов экспериментальных данных выделяют 5 наиболее вероятных форм разрушения плоских железобетонных плит перекрытия постоянного сечения при продавливании с учетом поперечного армирования (рис. 1):

1) *Разрушение бетона сжатой полосы в зоне сопряжения колонны с плитой перекрытия* (рис. 1, а).

2) *Разрушение плиты в зоне поперечного армирования* (рис. 1, б).

3) *Разрушение плиты за пределами зоны поперечного армирования* (рис. 1, в).

4) *Разрушение бетона плиты в результате его расслаивания.* В случае, когда анкерная часть поперечной арматуры плиты не заведена за стержни продольной арматуры (см. рис. 1, г), при достижении бетоном главных растягивающих напряжений в зоне между верхним продольным и поперечным армированием может произойти его расслаивание.

5) Пластическое разрушение плиты при достижении напряжений в продольной растянутой арматуре, равных пределу текучести (рис. 1, д).

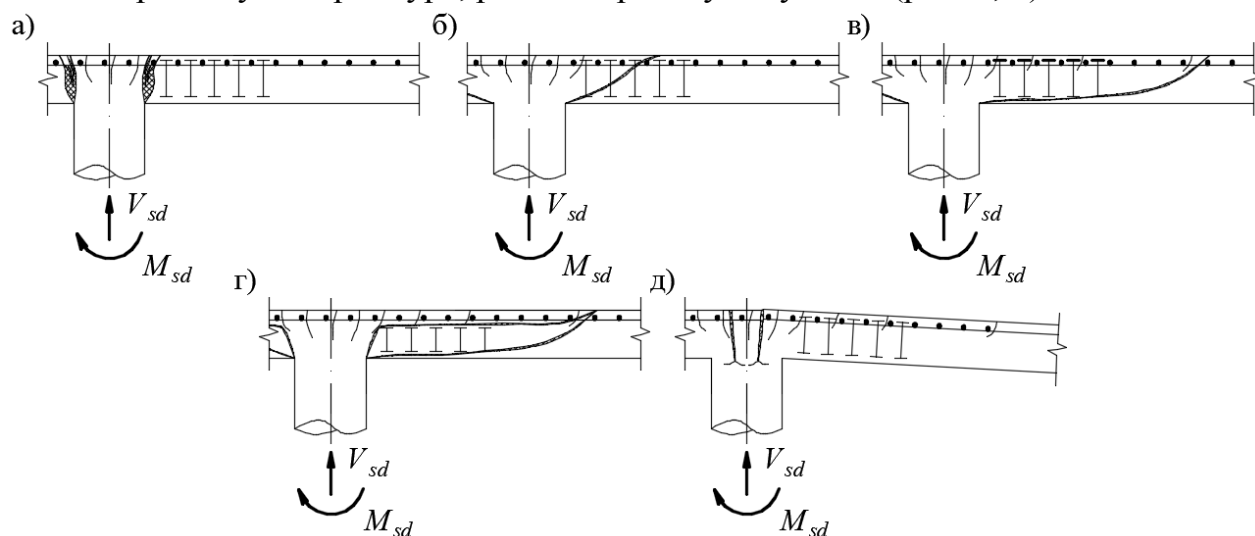


Рисунок 1 – Формы разрушения плиты перекрытия при продавливании

Нормативный документ *fib Model Code 2010* для железобетонных конструкций [1] был опубликован в 2012 году Международной федерацией конструктивных бетонов. В нем представлена принципиально новая модель расчета плоских железобетонных плит перекрытия на продавливание. По сравнению с расчетной методикой, изложенной в нормах ТКП EN 1992-1-1-2009 [2], которая имеет полуэмпирический характер, новая концепция расчета в нормах [1] основана на физической модели разрушения, так называемой “Теории критической трещины при продавливании” (Critical Shear Crack Theory).

В процедуре расчета плит на продавливание в нормах [1] реализован поэтапный подход к проектированию железобетонных конструкций, так называемый принцип уровней аппроксимации (*Level-of-approximation*). Идея этого принципа состоит в том, что количество расчетных параметров, используемых в физической модели, может быть уточнено при необходимости в несколько этапов. При предварительной грубой оценке несущей способности (в запас прочности) плиты используются упрощенные расчетные формулы с минимальным количеством параметров. В случаях, когда необходим более точный расчет (при нестандартной конфигурации конструкции, при учете совместного действия продавливающей силы и изгибающего момента, при учете нелинейной работы бетона и т.д.), расчет производится на более высоких уровнях LoA II – IV, требующих более сложных вычислений, а, следовательно, затраченного времени на расчет.

Согласно рассматриваемой теории прочность плиты при продавливании зависит от ширины раскрытия критической наклонной трещины, развивающейся в зоне критической сжатой полосы бетона (рис. 2) и шероховатости контактных поверхностей по границам трещины при взаимодействии частей конструкции между собой.

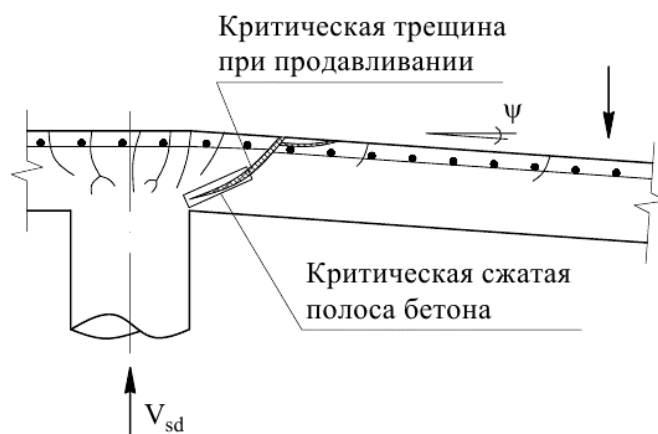


Рисунок 2 – Развитие критической трещины при продавливании

При этом ширина раскрытия критической наклонной трещины может быть определена в зависимости от величины угла поворота плиты ψ и эффективной высоты сечения плиты d_v . В нормах [1] эта зависимость включена в формулу определения несущей способности плиты на продавливание, обеспеченной работой бетона (при отсутствии поперечного армирования):

$$V_{Rd,c} = k_{ш} \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot b_0 \cdot d_v \geq V_{Ed}.$$

При необходимости учета в расчете поперечного армирования формула для определения несущей способности плиты при продавливании имеет стандартный вид:

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,s} \geq V_{Ed},$$

где $V_{Rd,s} = \sum A_{sw} \cdot k_e \cdot y_{swd}$ – несущая способность плиты на продавливание, обеспеченная работой поперечного армирования;

$$y_{swd} = \frac{E_s \cdot \psi}{6} \cdot \left(1 + \frac{f_{bd}}{f_{ywd}} \cdot \frac{d_v}{\phi_w} \right) \leq f_{ywd} \text{ – напряжение, возникающее}$$

в поперечной арматуре при продавливании в предельной стадии.

При этом величина несущей способности при продавливании ограничивается прочностью бетона по сжатой полосе:

$$V_{Rd,max} = k_{sys} k_{\psi} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0 d_v \leq \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0 d_v.$$

Здесь, коэффициент k_{sys} зависит от принятой системы армирования и обеспечения контроля расстановки арматуры в конструкции на строительной площадке.

Остальные обозначения приведены в [1].

Ранее было показано, что прочность плиты при продавливании определяется предельным углом поворота плиты ψ в деформированном состоянии

относительно горизонтальной плоскости. Таким образом, для оценки несущей способности плиты при продавливании необходимо определить зависимость между величиной продавливающей нагрузки V и углом поворота плиты ψ . При этом прочность плиты при продавливании будет определяться точкой пересечения на графике кривых “критерия разрушения” и “зависимости нагрузки – угла поворота плиты” (рис. 3).

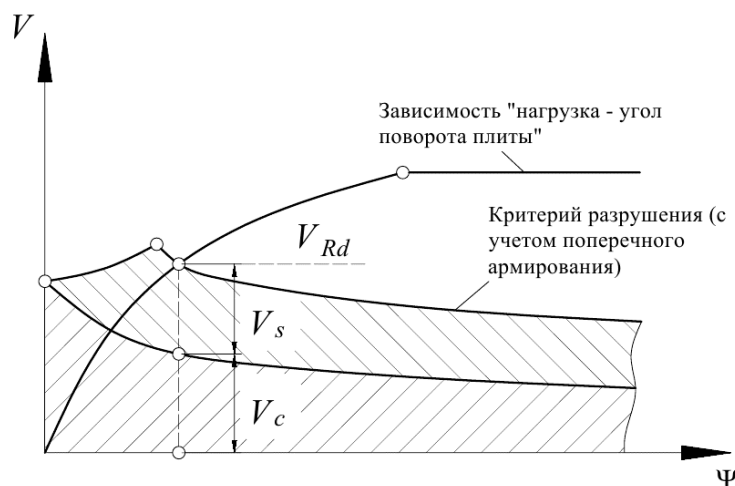


Рисунок 3 – Графическая интерпретация определения прочности плиты при продавливании

В общем случае (LoA IV) зависимость “нагрузка – угол поворота плиты” с учетом полилинейной зависимости “момент – кривизна” в сечении участка симметричной железобетонной плиты может быть выражена следующим образом [3]:

$$V = \frac{2 \cdot p}{r_q - r_c} \cdot \left(\begin{array}{l} -m_r \cdot r_0 + m_R \cdot \langle r_y - r_0 \rangle + E \cdot J_1 \cdot \psi \cdot \langle \ln(r_1) - \ln(r_y) \rangle + \\ + E \cdot J_1 \cdot \chi_{TS} \cdot \langle r_1 - r_y \rangle + m_{cr} \cdot \langle r_{cr} - r_1 \rangle + E \cdot J_0 \cdot \psi \cdot \langle \ln(r_s) - \ln(r_{cr}) \rangle \end{array} \right)$$

Обозначения и вывод зависимости представлен в работе [3].

Данная зависимость может быть упрощена путем пренебрежения эффектом “ужесточения” при растяжении (“tension stiffening”) и прочностью бетона при растяжении, что приводит к использованию билинейной зависимости “момент – кривизна”. Путем упрощений и преобразований с учетом аппроксимации кривой “нагрузка – угол поворота плиты” были выведены соотношения для определения угла поворота плиты ψ в зависимости от нагрузки:

$$\psi = 1.5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_{yd}}{E_s} \quad \text{— для LoA I (при условии линейной работы при отсутствии перераспределения усилий);}$$

$$\psi = 1.5 \cdot \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_{yd}}{E_s} \cdot \left(\frac{m_{Sd}}{m_{Rd}} \right)^{1.5} \quad \text{— для LoA II (с учетом перераспределения}$$

усилий).

Таблица 1 – Сравнительная характеристика расчетных моделей по [1] и [2]

№	Фактор, учитываемый в расчетной модели	<i>fib</i> Model Code 2010 [1]	ТКП EN 1992-1-1-2009 [2]
1	Расположение контрольного периметра u_1	Расположен на расстоянии $0.5d$ от площади нагружения	Расположен на расстоянии $2d$ от площади нагружения
2	Прочность бетона при осевом сжатии	Введение в расчет характеристической прочности бетона f_{ck} в степени $1/2$	Введение в расчет характеристической прочности бетона f_{ck} в степени $1/3$
3	Размер зерен крупного заполнителя	Учтен введением коэффициента $f_{dg} = \frac{32}{16 + d_g}$	—
4	“Масштабный” эффект (уменьшение прочности плиты на продавливание при увеличении ее эффективной высоты)	Учтен путем введения коэффициента “гибкости” плиты r_s / d при определении угла поворота	Учтен путем введения коэффициента $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$
5	Влияние величины пролета плиты на определение несущей способности при продавливании	Учтено путем введения коэффициента “гибкости” плиты r_s / d при определении угла поворота	—
6	Учет влияния продольного армирования плиты	Учтено при определении угла поворота плиты θ	Учтено путем введения в расчетную формулу величины коэффициента продольного армирования s_1 в степени $1/3$
7	Влияние эксцентриситета приложения продавливающей нагрузки на определение несущей способности плиты на продавливание	Учтено соотношением $\left(\frac{m_{sd}}{m_{rd}}\right)^{1.5}$ при определении угла поворота плиты θ_{sw} в предположении распределения средней величины погонного изгибающего момента по расчетной опорной полосе	Учтено введением коэффициента в предположении равномерного распределения напряжений среза вдоль контрольного периметра от действия неуравновешенного изгибающего момента
8	Расчетное значение предела текучести для поперечной арматуры	Введение в расчет расчетного значения сопротивления поперечной арматуры f_{yws}	Введение в расчет эффективного расчетного значения сопротивления поперечной арматуры $f_{yws,ef} = 250 + 0.25 \cdot d \leq f_{ywd}$
9	Влияние уровня напряжений в элементах поперечного армирования	Учтено в расчете u_{sws} при определении величины несущей способности по поперечной арматуре $V_{Rd,s}$	—
10	Влияние типа поперечного армирования (диаметра поперечных стержней, условий анкеровки, величины сцепления и т.д.)	Учтено при определении величины напряжений в поперечной арматуре u_{sws}	—

Основные принципы расчета плит на продавливание в действующих нормах [2], базируются на расчетной методике, представленной в *fib Model Code 1990* [4]. Основываясь в большей степени на результатах экспериментальных данных, включенная в нормы [2] модель является полуэмпирической.

В процессе анализа расчетных зависимостей были выявлены основные факторы, учитываемые в расчетной модели при определении прочности плиты при продавливании. Сравнительная характеристика расчетных моделей по нормам [1] и [2] приведена в таблице 1.

Стоит отметить, что оба подхода к расчету прочности плит на продавливание при наличии либо отсутствии поперечного армирования в нормах [1] и [2], хорошо согласуются с результатами испытаний опытных образцов и имеют достаточно простые и удобные процедуры расчета. Модель расчета на продавливание в нормах [1] учитывает более широкий спектр факторов, влияющие на прочность плиты, что делает эту модель более гибкой и точной. Преимуществом методики расчета, принятой в нормах [1], является то, что в ее основе лежит физическая модель. Процедура расчета, в основе которой лежит физическая модель, имеет ряд значительных преимуществ:

- расчетные зависимости, используемые при расчете, понятны и могут быть физически обоснованы;

- использование физической модели в перспективе позволяет расширить границы ее использования для решения более сложных задач (с различными материалами, системами армирования и т.д.);

- физическая модель универсальна и может быть адаптирована под различные варианты проектирования путем корректировки параметров.

Литература. 1. CEB-FIP Model Code for Concrete Structures 2010 / International Federation for Structural Concrete (*fib*). – London, 2012. – 402 p. 2. ТКП EN 1992-1-1:2009 Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий. / МАиС РБ. – Минск, 2010. – 207 с. 3. Muttoni, A. Shear and punching strength of slabs without shear reinforcement / A. Muttoni // *Beton und Stahlbetonbau*. – 2003. – Vol. 98, No. 2. – P. 74 – 78. 4. Birkle, G. Influence of slab thickness on punching shear strength / G. Birkle, W. Dilger // *ACI Structural Journal*. – 2008. – Vol. 105, No. 2. – P. 108 – 188. 5. Hamada S. Evaluation of Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs Based on Database / S. Hamada, Q. Yang, M. Mao // *Journal of Advanced Concrete Technology*. – 2008. – Vol. 6, No. 1 – P. 205 – 214.