

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.044:624.012.4

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МОДЕЛИ «РАСПОРКИ И ТЯЖИ» ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

О.Г. САННИКОВА; д-р техн. наук, проф. В.В. ТУР
(Брестский государственный технический университет)

На основании анализа зарубежных нормативных документов рассмотрены основные положения модели «Распорки и тяжи» («Strut-and-ties» model) для определения сопротивления срезу железобетонных элементов. Обобщены основные требования к конструированию и определению сопротивления сжатых и растянутых элементов модели. Рассмотрены различные подходы к определению сопротивления сжатых элементов модели с учетом коэффициента разупрочнения бетона.

Ключевые слова: железобетонные элементы, модель ферменной аналогии, сопротивление срезу, разупрочнение бетона, анкеровка арматуры.

Введение. Модель ферменной аналогии остается одним из наиболее доступных для понимания и простых в реализации методов расчета железобетонных элементов на срез [1–6]. Идеализация железобетонного элемента с трещинами в виде фермы с параллельными поясами основана на характерной системе сжатых и растянутых полей напряжений, возникающих вследствие внешнего воздействия. Однако, основываясь на гипотезе плоских сечений, модель ферменной аналогии определяет сопротивление поперечной силе, полагая равномерное распределение сжимающих и растягивающих напряжений по всему конструктивному элементу. При этом в рамках модели ферменной аналогии отдельно не рассмотрены части конструктивного элемента, в которых вследствие геометрической или статической неоднородности возникает неравномерное распределение напряжений, что, в свою очередь, искажает результаты расчета [7]. Кроме этого, классическая модель не учитывает появление пластических деформаций при работе элемента с трещинами, что ограничивает область применения данной модели.

Появление теории пластичности [8] позволило сформулировать положения усовершенствованной модели ферменной аналогии – модели «Распорки и тяжи» («Strut-and-ties» model) – для случая расчета на срез областей с неравномерным распределением напряжений. Следует отметить, что положения усовершенствованной модели «Распорки и тяжи», разработанные в первую очередь для расчета на действие поперечных сил областей с неравномерным распределением напряжений, не противоречат положениям классической модели ферменной аналогии и могут быть применимы для расчета на срез всего конструктивного элемента. В международной терминологии области с равномерным распределением напряжений классифицируют как *B*-области, а с неравномерным распределением напряжений – как *D*-области (рисунок 1).

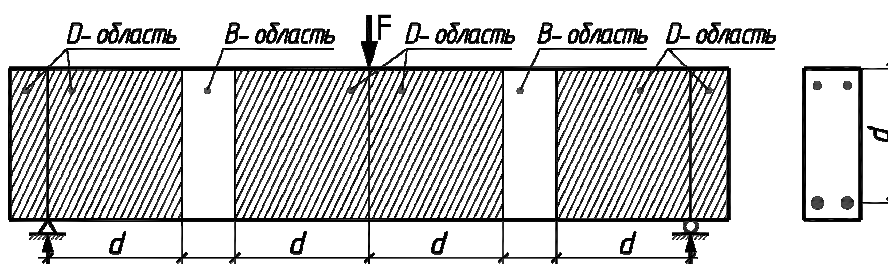


Рисунок 1. – Общий вид однопролетной железобетонной балки с выделением *B*- и *D*-областей

Границы *D*-областей с неравномерным распределением напряжений определяются на основании принципа Сен-Венана (рисунок 2, *а*), в соответствии с которым линейное распределение напряжений наблюдается на расстоянии, равном одной высоте сечения от точки приложения сосредоточенной силы (опорной реакции) или от места геометрической неоднородности, например, места изменения высоты сечения, расположения отверстия (рисунок 2, *б–ж*). В некоторых случаях, в частности в случае коротких балок, весь конструктивный элемент может представлять собой *D*-область (рисунок 2, *ж*).

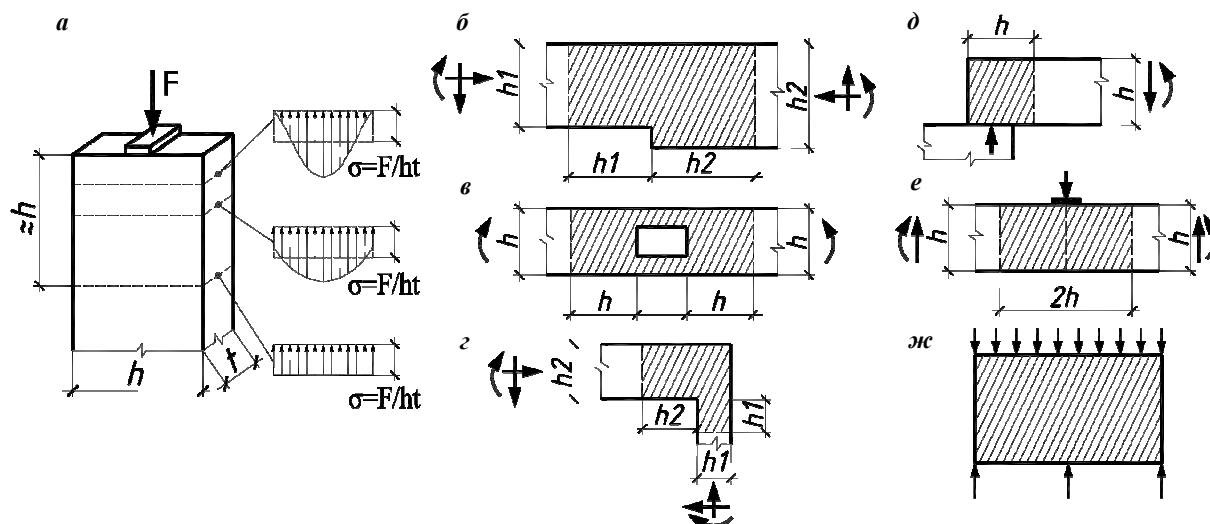
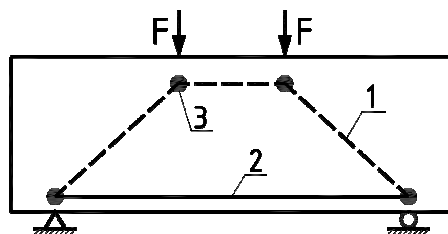


Рисунок 2. – Действие принципа Сен-Венана [9] (а) при определении D -областей с геометрической (б-г) и статической (д-ж) неоднородностью [10]

Следует отметить значительный интерес к модели «Распорки и тяжи» со стороны ведущих зарубежных научных школ, о чем свидетельствует не только принятие его в нормативных документах [10–13], но и непрерывное совершенствование основных положений по расчету, отражающееся в новых версиях отмеченных норм [13; 14].

Общие положения модели «Распорки и тяжи». Модель «Распорки и тяжи» основана на действительной физической модели железобетонного конструктивного элемента под нагрузкой, в соответствии с которой последний в условиях нагружения может быть представлен в виде системы сжатых полей в бетоне и растянутых полей в бетоне и арматуре. Основными элементами модели «Распорки и тяжи» являются: 1) распорки (struts), которые представляют собой равнодействующие сжимающих напряжений; 2) тяжи (ties) как равнодействующие растягивающих напряжений; 3) узловые элементы (nodes), которые являются пересечением распорок и тяжей, где происходит перераспределение напряжений (рисунок 3).



1 – центрально сжатая распорка;
2 – центрально растянутый тяж;
3 – узловой элемент

Рисунок 3. – Общий вид составляющих элементов модели «Распорки и тяжи»

Основные положения модели «Распорки и тяжи» базируются на следующих допущениях:

- геометрические параметры модели определяются исходя из действительной системы полей напряжений в упругой стадии работы конструктивного элемента;
- усилия в сжатых и растянутых элементах модели определяются на основании статической схемы расчета конструктивного элемента;
- расчет сжатых и растянутых элементов на прочность выполняется в соответствии с положениями теории пластичности.

Следует отметить, что рассматриваемая модель, в первую очередь, применяется для расчета новых и существующих железобетонных и предварительно напряженных железобетонных конструктивных элементов по первой группе предельных состояний. В то же время в некоторых исследованиях [7] и нормативных документах [11; 13] отмечается возможность расчета конструктивных элементов на основании данной модели и по второй группе предельных состояний, однако конкретные положения по расчету элементов в эксплуатационный период в отмеченных работах отсутствуют.

В общем случае на основании [7; 11; 12] порядок расчета железобетонных и предварительно напряженных железобетонных элементов в областях с неоднородным распределением напряжений может быть представлен в виде поэтапно выполняемых действий.

Этап 1. Выделение в конструктивном элементе областей с однородным (*B*-области) и неоднородным (*D*-области) распределением напряжений в соответствии с принципом Сен-Венана.

Этап 2. Определение всех действующих на конструктивный элемент нагрузок, а также опорных реакций. При этом, как отмечается в работе [15], моменты должны быть представлены в виде пары сил; сосредоточенные силы, действующие на незначительном расстоянии друг от друга, должны быть рассмотрены совместно; распределенные нагрузки должны быть представлены в виде системы сосредоточенных сил.

Этап 3. Анализ взаимодействия (анализ граничных условий) структурных компонентов (*B*-областей и *D*-областей), составляющих конструктивный элемент. Такой анализ выполняется в том случае, когда только часть (*D*-область) конструктивного элемента рассчитывается на основании модели «Распорки и тяжи», а действие *B*-области заменяют соответствующими усилиями.

Этап 4. Определение предварительных геометрических параметров конструктивного элемента на основании расчета предельной поперечной силы, при которой образуются диагональные трещины в эксплуатационный период (shear serviceability check).

Этап 5. Разработка модели «Распорки и тяжи». На данном этапе определяется положение распорок и тяжей в первом приближении.

Этап 6. Определение усилий в элементах модели (распорках и тяжах) на основании статической схемы расчета. Действующие нагрузки должны быть полностью уравновешены усилиями в структурных элементах модели.

Этап 7. Конструирование распорок и тяжей (а именно определение геометрических параметров сжатых распорок и площади поперечного сечения арматуры и ее расположения в конструктивном элементе) на основании сопротивления данных элементов в предельной стадии работы конструктивного элемента.

Этап 8. Конструирование узловых элементов на основании их сопротивления в предельной стадии работы конструктивного элемента.

Этап 9. Корректировка первоначальной модели «Распорки и тяжи» (в случае необходимости).

Этап 10. Конструирование армирования, требуемого для ограничения ширины раскрытия трещин по высоте конструктивного элемента (crack control reinforcement).

Этап 11. Обеспечение требований анкеровки продольной арматуры.

Независимо от того, в соответствии с каким нормативным документом выполняется расчет железобетонного элемента в области с неоднородным распределением напряжений на действие поперечной силы [10–13], общая концепция модели «Распорки и тяжи» [7] в целом следует приведенному ранее алгоритму расчета. При этом только два нормативных документа [11; 12] акцентируют внимание именно на порядке расчета в соответствии с моделью «Распорки и тяжи». Причем только в одних нормах [11] содержится требование по определению предельной поперечной силы в эксплуатационный период, и в то же время, полагая прочность узловых элементов наиболее важной, прочности сжатых распорок не уделено должного внимания. Отметим, что остальные нормативные документы [10; 12; 13] ограничиваются лишь основными требованиями к конструированию и прочности узловых элементов, распорок и тяжей.

Анализируя нормативные документы [10–13], а также работы [7; 15], можно сделать вывод о том, что в рамках некоторой единой концепции модели «Распорки и тяжи» отсутствует единый подход к содержанию отдельных этапов расчета в соответствии с данной моделью. Так, если при разделении конструктивного элемента на области с однородным и неоднородным распределением напряжений в соответствии с принципом Сен-Венана (этап 1), при определении внешних нагрузок и опорных реакций (этап 2), при анализе граничных условий между *B*- и *D*-областями (этап 3), а также при определении усилий в структурных элементах модели (этап 6) никаких расхождений в нормах [10–13] не возникает, то на всех остальных этапах расчета в отмеченных нормах приводятся свои отличительные требования в рамках модели «Распорки и тяжи».

Рассмотрим более подробно отличительные требования к расчету железобетонных элементов в областях с неравномерным распределением напряжений при действии поперечных сил в соответствии с моделью «Распорки и тяжи».

Определение предварительных геометрических параметров конструктивного элемента на основании расчета предельной поперечной силы, при которой образуются диагональные трещины в эксплуатационный период

Как было отмечено выше, только в нормах [11] определяется предельная поперечная сила, при которой начинают образовываться наклонные трещины в эксплуатационный период:

$$V_{cr} = \left[0,2 - 0,1 \cdot \left(\frac{a}{d} \right) \right] \cdot \sqrt{f_{cd}} \cdot b_w \cdot d, \quad (1)$$

при этом

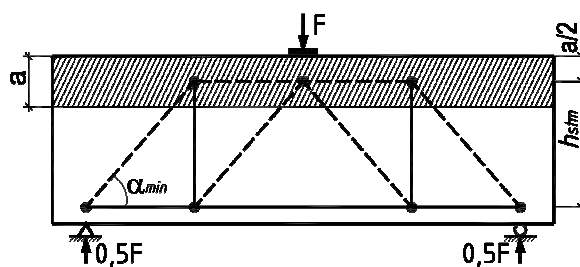
$$0,0632 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \leq V_{cr} \leq 0,158 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \leq V_{cr}, \quad (2)$$

где f'_c – расчетная прочность бетона на сжатие, определенная на цилиндрических образцах в стандартных условиях (в ksi); a – пролет среза (в дюймах); d – расчетная высота сечения конструктивного элемента (в дюймах); b_w – ширина поперечного сечения конструктивного элемента (в дюймах).

Если действующая поперечная сила V от эксплуатационных нагрузок не превышает предельную поперечную силу V_{cr} , определенную по зависимости (1), это значит, что при принятых геометрических параметрах поперечного сечения конструктивного элемента в эксплуатационный период наклонные трещины не будут образованы. Иначе необходимо изменить геометрические параметры поперечного сечения конструктивного элемента. Отметим, что зависимость (1) может быть применима в случае, если выполняется условие $a/d < 2$.

Разработка модели «Распорки и тяжи»

Геометрическая интерпретация модели «Распорки и тяжи» (рисунок 4) является одним из наиболее значимых этапов расчета, поскольку именно от него зависит как точность, так и продолжительность расчета в целом.



a – высота сжатой зоны; h_{stm} – оптимальная высота модели

Рисунок 4. – Расположение структурных элементов модели «Распорки и тяжи»

Построение модели «Распорки и тяжи» может осуществляться следующими способами [15]: 1) на основании принципа «траектории эффекта нагрузки» («load path»), учитывающего места расположения сосредоточенных сил и опорных реакций; 2) используя характерную схему трещинообразования; 3) посредством расчета в любом программном комплексе, использующем метод конечных элементов и позволяющем наглядно представить систему сжатых и растянутых полей в условиях нагружения. При этом независимо от пути построения модели должны быть соблюдены следующие требования [7; 10–13; 15]:

- центрально сжатые элементы (распорки) представляют собой равнодействующие сжатых полей напряжений; центрально растянутые элементы (тяжи) – равнодействующие растянутых полей напряжений;
- местоположение тяжей является центром тяжести растянутой арматуры;
- минимальный угол между наклонными распорками и тяжами, расположенными в центре тяжести растянутой арматуры, составляет 25° (рисунок 5) [10; 11];
- наиболее рациональной является модель с минимальным количеством вертикальных тяжей при их минимальной длине;
- положение и направление распорок и тяжей должны быть ориентированы в соответствии с линейной теорией упругости;
- призматическая распорка должна быть расположена в середине высоты сжатой зоны, при этом высота сжатой зоны определяется по зависимости:

$$a = \frac{A_s \cdot f_s - A'_s \cdot f'_s}{a_1 \cdot f'_c \cdot b_w}, \quad (3)$$

где A_s, A'_s – площадь поперечного сечения нижней и верхней арматуры соответственно; f_s, f'_s – расчетное сопротивление нижней и верхней арматуры соответственно; a_1 – коэффициент сжатой зоны (при расчете по [10; 11] $a_1 = 0,85$; при расчете по [12; 13] $a_1 = 0,8$);

- полученная модель должна находиться в равновесии.

Следует отметить, что ограничение минимального угла наклона сжатой распорки $\alpha = 25^\circ$ получено на основании экспериментальных данных и направлено на недопущение значительных напряжений в арматуре и сдерживание ширины раскрытия диагональных трещин [7; 15]. Однако в нормах [12; 13] специальных требований по ограничению угла наклона сжатых распорок не указано.

Отметим также, что одной из особенностей модели «Распорки и тяжи» является то, что при конкретной схеме нагружения и геометрических характеристиках конструктивного элемента может быть получено несколько расчетных моделей [7].

Конструирование и расчет сопротивления сжатым и растянутым структурным элементам модели «Распорки и тяжи»

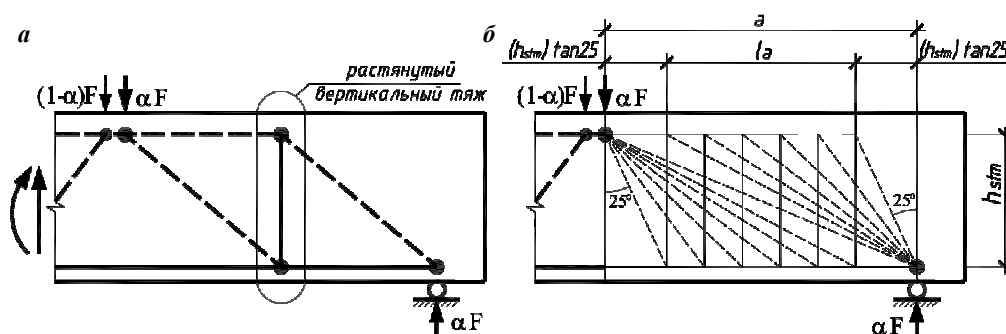
Конструирование и расчет сопротивления растянутым тяжам

Конструирование и расчет сопротивления растянутым тяжам, которые в большинстве случаев представляют собой центр тяжести растянутой арматуры, являются наименее спорным вопросом в модели «Распорки и тяжи». В общем случае сопротивление осевому растяжению тяжей определяется следующим образом [10]:

$$F_{u,ie} = f_y \cdot A_{st} + A_{sp} \cdot (f_{pe} + f_y), \quad (4)$$

где f_y, f_{pe} – предел текучести ненапрягаемой и напрягаемой арматуры соответственно; A_{st}, A_{ps} – площадь поперечного сечения ненапрягаемой и напрягаемой арматуры соответственно.

Следует обратить внимание, что расчет сопротивления и конструирование вертикальных тяжей рекомендуется выполнять, руководствуясь требованиями, приведенными на рисунке 5 [10].



α – пролет среза; l_a – рабочая длина (available length)
 a – расположение вертикального тяжа в модели; b – расположение стержней поперечной арматуры

Рисунок 5. – Требования к расположению стержней поперечной арматуры

Конструирование и расчет сопротивления сжатым распоркам

На основании [7] выделяют три формы распределения сжимающих напряжений (рисунок 6):

1) призматическая форма; 2) «fan-shaped» форма; 3) «bottle-shaped» форма.

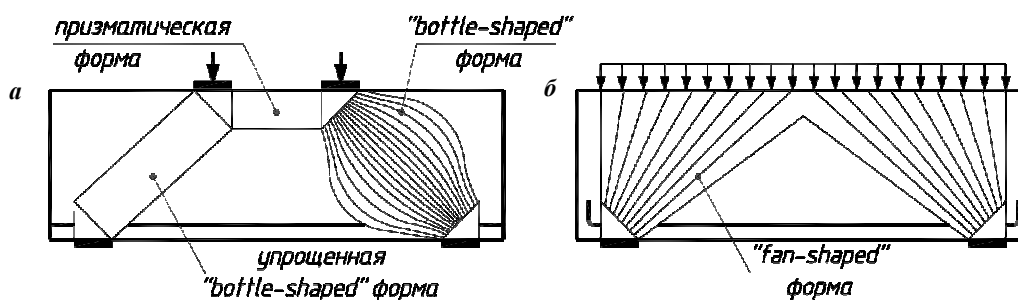


Рисунок 6. – Расположение в конструктивном элементе полей напряжений призматической формы (а), «bottle-shaped» формы (а), «fan-shaped» формы (б)

Первые две формы (призматическая и «fan-shaped») характеризуются отсутствием в них растягивающих напряжений. Особенностью сжатых полей напряжений «bottle-shaped» формы, располагаемых по линии действия «сила – опора», является наличие в их пределах растягивающих напряжений, что приводит к снижению прочности на сжатие результирующей распорки (так называемый «эффект разупрочнения») и учитывается посредством коэффициента разупрочнения бетона.

Отметим, что определение коэффициента разупрочнения бетона при плоском напряженном состоянии является весьма спорным вопросом, о чем свидетельствуют многочисленные диаграммы деформирования бетона в условиях «растяжение – сжатие» [16; 17]. Различие в подходах к определению коэффициента разупрочнения бетона нашло отражение и в модели «Распорки и тяжи» (таблицы 1, 2).

Предельное усилие в сжатой бетонной распорке в общем случае определяется по следующей зависимости:

$$F_{u, strut} = f_{max, strut} \cdot A_{c, strut}, \quad (5)$$

где $f_{max, strut}$ – предельное напряжение сжатой бетонной распорки (таблица 1); $A_{c, strut}$ – площадь поперечного сечения бетона распорки.

Особенности расчета предельного напряжения сжатой бетонной распорки с учетом коэффициента разупрочнения бетона в соответствии с требованиями норм [10–13] приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Особенности определения сжимающих напряжений в бетонных распорках

Нормы	Напряжения в бетоне	Примечание
[10]	$f_{ce} = 0,85 \cdot \beta_s \cdot f_c' \quad (6)$	β_s – коэффициент разупрочнения бетона распорки, принимается в зависимости от коэффициента армирования ρ_{ss} : $\beta_s = \begin{cases} 0,75 \cdot \lambda, & \text{если } \rho_{ss} \geq 0,3\%; \\ 0,6 \cdot \lambda, & \text{если } \rho_{ss} < 0,3\%. \end{cases} \quad \rho_{ss} = \sum \frac{A_{si}}{b_s \cdot s_i} \cdot \sin \alpha_i \quad (7)$ λ – коэффициент, для тяжелого бетона равный 1
[11]	$f_{cu} = 0,7 \cdot f_{ci} \quad (8)$	f_{ci} – расчетная прочность бетона на сжатие к началу нагружения конструктивно-го элемента
[12]	$f_{cE} = k_c \cdot f_{ck} \quad (9)$	k_c – коэффициент разупрочнения бетона распорки, принимается равным: $k_c = 0,75 \cdot \eta_{fc}$ (в случае распорок с трещинами, параллельными направлению сжимающих напряжений и армированными стержнями, перпендикулярными сжимающим напряжениям); $k_c = 1,0 \cdot \eta_{fc}$ (в случае распорок с равномерным одноосным сжатием); $k_c = 0,55 \cdot \eta_{fc}$ (в случае распорок, пересекаемых арматурой под углом $\leq 65^\circ$) $\eta_{fc} = (30/f_{ck})^{1/3} \leq 1,0 \quad (10)$
[13]	$\sigma_{cd} = v \cdot f_{cd} \quad (11)$	v – коэффициент разупрочнения бетона распорки, определяется на основании зависимости: $v = \frac{1}{1,2 + 80 \cdot \epsilon_1}; \quad \epsilon_1 = \epsilon_x + (\epsilon_x + 0,001) \cdot \cos^2 \theta_{sc} \quad (12)$ Принимая $\epsilon_x \approx 0,001$: $v = \frac{1}{1,2 + 0,16 \cdot \cos^2 \theta_{sc}} \leq 1. \quad (13)$ Коэффициент разупрочнения v с учетом зависимостей (12) и (13) можно определить упрощенно следующим образом: - для сжатых распорок, пересекаемых растянутым тяжом под углом θ_{sc} : $v = \begin{cases} 0,4, & \text{если } 20^\circ \leq \theta_{sc} < 25^\circ; \\ 0,5, & \text{если } 25^\circ \leq \theta_{sc} < 35^\circ; \\ 0,6, & \text{если } 35^\circ \leq \theta_{sc} < 45^\circ; \\ 0,7, & \text{если } 45^\circ \leq \theta_{sc} < 90^\circ; \end{cases} \quad (14)$ - для сжатых распорок: 1) испытывающих сжимающие напряжения в перпендикулярном направлении или 2) при отсутствии растянутых тяжей: $v = 1$
Примечание. Обозначения характеристик бетона в таблице приняты в соответствии с рассматриваемым нормативным документом без изменений.		

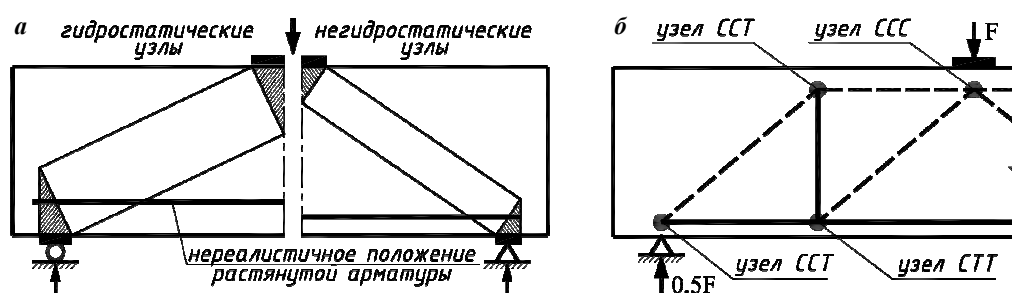
Конструирование и расчет сопротивления узловых элементов

Узловые элементы, представляя собой фактически точку пересечения распорок и тяжей, обеспечивают перераспределение напряжений между сжатыми и растянутыми структурными элементами модели и тем самым приводят систему в равновесие. Причем такое перераспределение напряжений реализуется на ограниченной области, вокруг узла, что вызывает значительные напряжения в пределах узловых элементов [7].

Рассматривая возможное распределение напряжений на поверхности узлового элемента, выделяют гидростатические и негидростатические узлы [10]. Для гидростатического узла характерно равенство напряжений по всем его поверхностям, в то время как негидростатический узел формируется посредством действительного распределения напряжений в конструктивном элементе (рисунок 7, а). Ввиду того, что модель «Распорки и тяжи» стремится отобразить работу конструктивного элемента максимально приближенно к действительности, нормы [10–13] рекомендуют рассматривать только негидростатические узлы.

В общем случае, в зависимости от типов структурных элементов (сжатые распорки (compression), растянутые тяжи (tension)), сходящихся в узлах, выделяют четыре типа последних [7; 10; 11; 13]: узел ССС, который образован сжатыми распорками; узел ССТ, в котором сходятся сжатые распорки и растянутый тяж, ориентированный в одном направлении; узел СТТ, в котором сходятся сжатые распорки и растянутые тяжи, ориентированные в двух направлениях; узел ТТТ, который образован только растянутыми тяжами (рисунок 7, б).

Отметим, что узел типа ТТТ встречается на практике крайне редко, поскольку в качестве одного из тяжей предполагается растянутый бетон. По этой причине в нормативных документах [10–13] приведены требования к конструированию и расчету только узловых элементов типа ССС, ССТ и СТТ.



а – гидростатические и негидростатические узлы;
б – пример расположения узловых элементов

Рисунок 7. – Узловые элементы модели «Распорки и тяжи»

Конструирование всех типов узлов осуществляется на основании расчетной схемы модели «Распорки и тяжи» в соответствии со следующими правилами:

- 1) каждый узел ограничен тремя поверхностями, по которым действуют напряжения:
«Strut-to-Node»- поверхность – на границе с примыкающей сжатой распоркой,
«Back»-поверхность – обратная границе примыкания сжатой распорки,
«Bearing»-поверхность – со стороны приложения нагрузки или опорной реакции;
- 2) усилия, действующие по каждой поверхности, направлены перпендикулярно рассматриваемой поверхности по линии, проходящей через ее центр тяжести;
- 3) в узле должно сходитьсь не более трех структурных элементов, иначе смежные структурные элементы должны быть рассмотрены совместно;
- 4) в случае узлового элемента типа ССС для упрощения расчета рассматриваются отдельно правая и левая части.

Для наглядности требования к конструированию узловых элементов приведены на рисунках 8, 9.

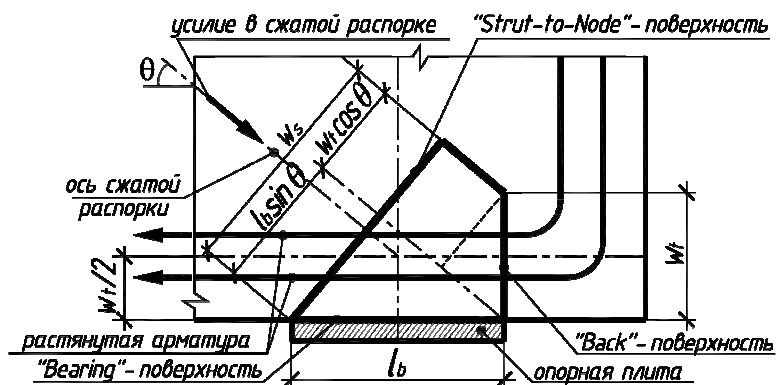


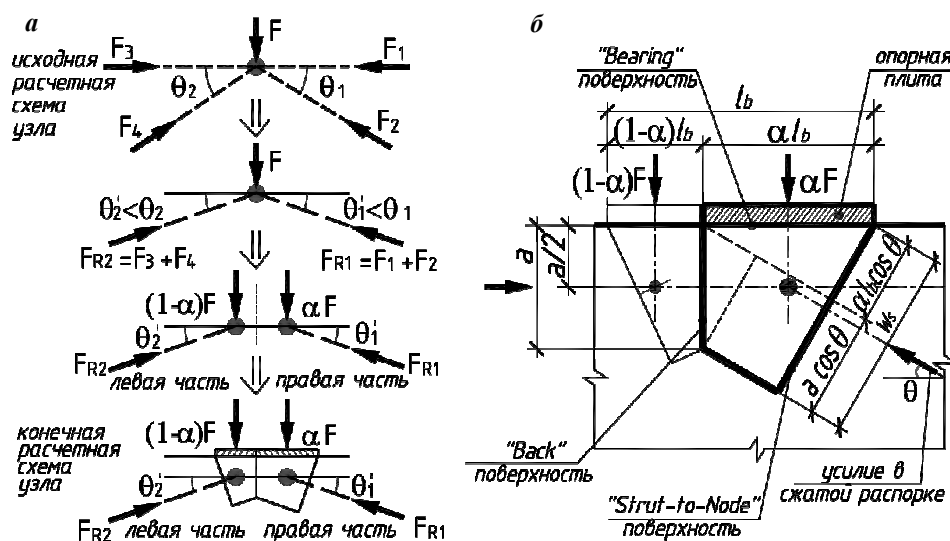
Рисунок 8. – Геометрические параметры узла типа ССТ [15]

На рисунке 8 приняты следующие обозначения: w_t – длина «Back»-поверхности, принимается равной двойному расстоянию от наиболее растянутой грани конструктивного элемента до центра тяжести растянутой арматуры; l_b – длина «Bearing»-поверхности, принимается равной длине опорной пластины; w_s – длина «Strut-to-Node»-поверхности, определяется по следующей зависимости:

$$w_s = l_b \cdot \sin \theta + w_t \cdot \cos \theta, \quad (15)$$

где θ – угол наклона сжатой распорки.

Наиболее трудоемкими в конструировании являются узлы типа ССС, поскольку в большинстве случаев в таких узлах сходятся более трех распорок, следовательно, требуется корректировка узла в виде сокращения количества распорок и дальнейшего разделения узла на правую и левую части. Порядок конструирования узла типа ССС приведен на рисунке 9.



a – корректировка расчетной схемы узла;
б – геометрические параметры откорректированного узла

Рисунок 9. – Порядок конструирования узла типа ССС

В соответствии с рисунком 9 длина «Strut-to-Node» определяется из выражения

$$w_s = a \cdot \cos \theta + \alpha \cdot l_b \cdot \sin \theta, \quad (16)$$

где a – высота сжатой зоны, определяемая из выражения (3).

Отметим, что после разделения узлового элемента типа ССС на части (правую и левую) к дальнейшему рассмотрению принимается наиболее нагруженная.

Проанализированные выше узловы элементы типа ССТ и ССС, называемые в соответствии с [7] единичными, обладают четкими геометрическими параметрами. В некоторых случаях узлы типа ССТ (рисунок 10), могут классифицироваться как «размазанные» (smeared nodes), поскольку для них невозможно определить конкретные геометрические параметры ввиду отсутствия примыкающих опорных плит или четких границ конструктивного элемента. Кроме этого, наклонные распорки, сходящиеся в таких узлах, рассеивают напряжения на значительные расстояния [7]. По этим причинам, а также ввиду незначительных напряжений в пределах «размазанных» узлов в работе [7] рекомендуется такие узлы не проверять на прочность.

Согласно [15], несущая способность узлового элемента должна быть достаточной, чтобы воспринимать воздействие от сходящихся в нем структурных элементов без разрушения бетона. В общем случае предельное усилие, воспринимаемое поверхностью узла, определяется по зависимости:

$$F_{u,node} = f_{\max,node} \cdot A_{c,node}, \quad (17)$$

где $f_{\max,node}$ – предельное сжимающее напряжение на поверхности узла (таблица 2); $A_{c,node}$ – площадь поперечного сечения бетона узловы поверхности.

Таблица 2. – Определение предельных напряжений на узловых поверхностях

Нормы	Предельные напряжения на узловой поверхности
[10]	$f_{ce} = 0,85 \cdot \beta_n \cdot f'_c, \quad (18)$ <p>где β_n – коэффициент разупрочнения бетона: $\beta_n = 1$ (узел CCC), $\beta_n = 0,8$ (узел CCT), $\beta_n = 0,6$ (узел CTT); f'_c – расчетное значение цилиндрической прочности бетона на сжатие</p>
[11]	$f_{cu} = m \cdot v \cdot f'_c \quad (19)$ <p>где m – коэффициент, учитывающий положительный эффект от трехосного сжатия в бетоне; v – коэффициент разупрочнения бетона; f'_c – расчетное значение цилиндрической прочности бетона на сжатие. При отсутствии арматуры, требуемой для ограничения ширины раскрытия трещины по высоте, коэффициент $v = 0,45$ для всех типов узловых поверхностей.</p>
[12]	$\sigma_{Rd,max} = k_c \cdot f_{ck}, \quad (20)$ <p>где k_c – коэффициент разупрочнения бетона; f_{ck} – характеристическое значение цилиндрической прочности на сжатие в возрасте 28 суток</p>
[13]	$\sigma_{cd} = v \cdot f_{cd} \quad (21)$ <p>где v – коэффициент разупрочнения бетона.</p> <p>$v = 1$</p> <ul style="list-style-type: none"> - если тяж полностью заанкерен внутри узловой зоны элемента: v – по формуле (14) в таблице 1; - если тяж заанкерен за пределами узловой зоны элемента: $v = 1$; - принимается промежуточное значение v в зависимости от степени анкеровки <p>- в случае гнутых профилей, а также, если тяж заанкерен внутри узловой зоны элемента: v – по формуле (14) в таблице 1;</p> <p>- если тяж заанкерен за пределами узловой зоны элемента: $v = 1$</p>
<p><i>Примечание.</i> Обозначения характеристик бетона в таблице приняты в соответствии с рассматриваемым нормативным документом без изменений.</p>	

Конструирование армирования, требуемого для ограничения ширины раскрытия трещины по высоте конструктивного элемента (crack control reinforcement)

Данный тип армирования представлен на рисунке 10.

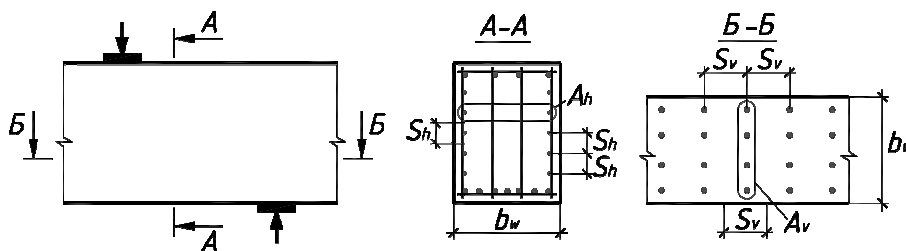


Рисунок 10. – Ограничивающая арматура

Ограничивающая арматура рекомендуется только нормативными документами [10; 11] для ограничения ширины раскрытия диагональной трещины при эксплуатационных нагрузках для всех конструктивных элементов за исключением плит и фундаментов, при этом минимальный коэффициент ограничивающего армирования принимается равным 0,3% в каждом направлении:

$$\rho_{sv} = \frac{A_v}{b_w \cdot S_v} \geq 0,3\%; \quad \rho_{sh} = \frac{A_h}{b_w \cdot S_h} \geq 0,3\%, \quad (22)$$

где A_v, A_h – площадь поперечного сечения ограничивающей арматуры в вертикальном и горизонтальном направлении соответственно; b_w – ширина поперечного сечения конструктивного элемента; S_v, S_h – шаг ограничивающей арматуры в вертикальном и горизонтальном направлении соответственно; $S_v, S_h \leq d/4$ или 12 in.

Обеспечение требований анкеровки продольной арматуры

Несмотря на то, что обеспечение требований анкеровки арматуры приводится в завершении алгоритма расчета в соответствии с моделью «Распорки и тяжи», данный этап является одним из ключевых, поскольку только при достаточной длине анкеровки продольной арматуры возможно перераспределение напряжений в узловых элементах, а следовательно и реализация модели в целом [7]. Отметим также, что проверка прочности структурных элементов модели (распорок, тяжей и узлов) выполняется с учетом обеспеченной длины анкеровки продольной арматуры.

Согласно [11], критическое сечение для определения длины анкеровки арматуры в узловом элементе определяется в соответствии с рисунком 11.

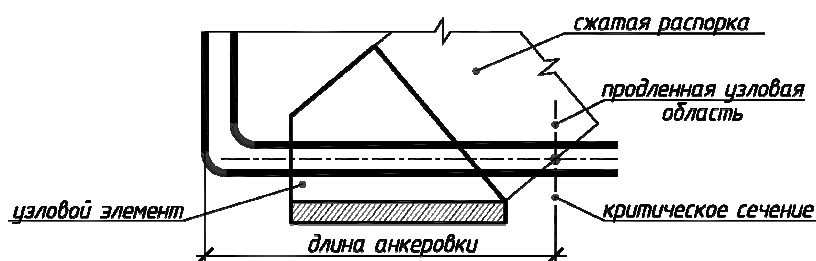


Рисунок 11. – Определение длины анкеровки растянутых тяжей

Таким образом, в заключение проведенного исследования можно сделать следующие **выводы**:

- комплексное рассмотрение основных положений по расчету железобетонных конструктивных элементов в соответствии с моделью «Распорки и тяжи» на основании требований нормативных документов [10–13] позволяет констатировать, что отмеченная модель, несмотря на длительность итерационных процедур, в доступной и достаточно адекватной форме воспроизводит сложную работу конструктивного элемента в условиях нагружения в виде системы центрально сжатых и центрально растянутых структурных элементов;

- на основании данной модели в первую очередь возможно определение сопротивления тех областей конструктивного элемента, где местное действие нагрузки (например, вблизи опор) оказывает существенное влияние на прочность элемента в целом. При этом общая концепция модели не противоречит положениям классической модели ферменной аналогии и может быть рассмотрена при расчете сопротивления всего конструктивного элемента;

- накопленный практический опыт применения модели «Распорки и тяжи», в первую очередь в области геотехнических сооружений, где действие поперечных сил оказывает определяющее влияние на прочность элемента в целом, свидетельствует о содержательной и рациональной концепции модели [7], позволяющей адаптировать порядок расчета к возможным ситуациям или условиям, определяющим расчетные требования к строительным конструкциям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ritter, W. Die Bauweise Hennebique / W. Ritter // Schweizerische Bauzeitung. – 1899. – V. 33, № 7. – P. 59–61.
2. Mörsch, E. Concrete-Steel Construction / E. Mörsch // McGraw-Hill (English translation by E.P. Goodrich). – New York, 1909.
3. Lampert, P. Ultimate Strength and Design of Reinforced Concrete Beams in Torsion and Bending / P. Lampert, B. Thürlimann // IABSE Publications. – Zurich, Switzerland, 1971. – № 31-1. – P. 107–131.

4. Ramirez, J. Evaluation of Modified Truss-Model Approach for Beams in Shear / J. Ramirez, J.E. Breen // Center for Transportation Research Report № 248-4F. – Austin, Texas, 1983.
5. Ramirez, J. Proposed Design Procedure for Shear and Torsion in Reinforced and Prestressed Concrete / J. Ramirez, J.E. Breen // ACI Structural Journal. – 1991. – V. 88, № 5. – P. 562–571.
6. Kupfer, H. Erweiterung der Mörsch Schen Fachwerkanalogie mit Hilfe des Prinzips von Minimum der Formänderungsarbeit (Generalization of Mörsch Truss Analogy Using the Principle of Minimum Strain Energy) / H. Kupfer // Comite Euro-International du Beton, Bulletin d'Information, № 40, CEB. – Paris, 1964. – P. 44–57.
7. Schlaich, J. Towards a Consistent Design of Structural Concrete / J. Schlaich, K. Schäfer, M. Jennewein // Journal of the Prestressed Concrete Institute. – May-June 1987. – V. 32. – № 3. – P. 74–150.
8. Гвоздев, А.А. Определение разрушающей нагрузки для статически неопределимых систем, претерпевающих пластические деформации / А.А. Гвоздев. – Проект и стандарт, 1934. – № 8. – С. 10–16.
9. Examination of the AASHTO LRFD Strut and Tie Specifications. Center for Transportation Research Report 0-4371-2 / M.D. Brown [et al.]. – University of Texas, Austin, April 2006. – 330 p.
10. ACI (American Concrete Institute) Committee 318. 2014. Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318 – 14) and Commentary (ACI 318R-14). – Farmington Hills, MI: ACI.
11. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. – 8th Edition. – Washington, September 2017.
12. *fib* Model Code 2010, Vol.1. – Federal Institute of Technology Lausanne – EPFL, Lausanne, March 2010.
13. Design of Concrete Structures – Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures: prEN 1992-1-1:2018 (Eurocode 2). – Brussel : European Committee for Standardization, April 2018. – 293 p.
14. Design of Concrete Structures. General Rules and Rules for Buildings: EN 1992-1: 2001 (Eurocode 2) / Brussel : European Committee for Standardization, Introduced October 2001. – 230 p.
15. Williams, C. Strut-and-Tie Model Design Examples for Bridges: Final Report FHWA/TX-12/5-5253-01-1 / C. Williams, D. Deschenes, O. Bayrak. – Center for Transportation Research, The University of Texas, Austin. – June 2012.
16. Тур, В.В. Расчет железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил / В.В. Тур, А.А. Кондраччик. – Брест : БрГТУ, 2000. – 397 с.
17. Тур, В.В. Прочность и деформации бетона в расчетах конструкций / В.В. Тур, Н.А. Рак. – Брест : БрГТУ, 2003. – 252 с.

Поступила 05.12.2018

THE MAIN PROVISIONS OF “STRUT-AND-TIES” MODEL FOR THE CALCULATION OF SHEAR RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

V. SANNIKAVA, V. TUR

The main provisions of “Strut-and-ties” model, based on the current code requirements are considered. The basic requirements for design and calculation of resistance of compression and tension model elements are summarized. Various approaches to the calculation of the resistance of compression elements, taking into account the softening coefficient of concrete are presented.

Keywords: reinforced concrete elements, model, truss analogy, shear strength, softening of concrete, anchorage of reinforcement.