

успешно решать задачи по развитию и реконструкции оборудования подстанций, электростанций, котельных, систем тепло- и электроснабжения [2, с. 21].

В течение первой пятилетки нового тысячелетия в Беларуси были воплощены в жизнь грандиозные планы технического переоснащения отрасли. Среди реализованных в тот период проектов — реконструкция блоков ст. № 3, 4 Березовской ГРЭС с надстройкой их газовыми турбинами мощностью по 25 МВт, а также реконструкция паровой турбины блока ст. № 3 Лукомльской ГРЭС с увеличением ее мощности на 7,5 МВт. Кроме того, была проведена реконструкция Витебской ТЭЦ, Пинской ТЭЦ, Полоцкой ТЭЦ, Бобруйской ТЭЦ-1, Могилевской ТЭЦ-1, Гомельской ТЭЦ-1, Лидской ТЭЦ с заменой отработавших ресурс турбоагрегатов; реконструировано 14 подстанций (ПС) 35-110 кВ с установкой дополнительных трансформаторов, современного оборудования и устройств РЗА; построена высоковольтная линия электропередачи (ВЛ) 330 кВ Барановичи–Россь–Гродно с модернизацией ПС 330 кВ в Барановичах и Гродно, введен в работу шунтирующий реактор на ПС 330 «Барановичи»; начался экспорт электроэнергии в Польшу, для чего выполнена модернизация блока ст. № 5 Березовской ГРЭС и построена ВЛ 110 кВ Брест-2–Вулька-Добрыньска. За этот пятилетний период потребление электроэнергии в республике возросло с 30,71 до 32,79 млрд кВт·ч, а инвестиции в основной капитал белорусской энергосистемы составили более \$ 1 млрд. [2, с. 21].

Список использованных источников:

1. К 50-летию ПС «Россь»: гордость электросетевой энергетики Гродненщины // Гродненское унитарное республиканское предприятие электроэнергетики «Гродноэнерго» [Электронный ресурс]. – 2010–2020. – Режим доступа: <http://www.energo.grodno.by/content/%D0%BA-50-%D0%BB%D0%B5%D1%82%D0%B8%D1%8E>. – Дата доступа: 12.03.2020.
2. Становление энергетики Беларуси. Путь длиною в жизнь // Энергетическая Стратегия. – 2011. – № 2. – С. 20–29.

Молош В.В., Томашев И.Г.

**МОДЕЛЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ ПРИ ПРОДАВЛИВАНИИ
ПЛОСКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ БЕЗ ПОПЕРЕЧНОЙ
АРМАТУРЫ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ТЕОРИИ ПОЛЕЙ
СЖАТИЯ В ЗАМКНУТОМ ВИДЕ**

Брестский государственный технический университет, кафедра прикладной механики

Введение. Несмотря на многочисленные исследования, проведенные с целью изучения сопротивления железобетонных элементов срезу, к настоящему времени до конца не ясен механизм перераспределения внутренних усилий и деформаций, возникающий при этом виде деформации элементов, и не разработана точная и надежная расчетная модель, позволяющая предсказывать величину предельных сил сопротивления. В последние годы к этому вопросу все чаще обращаются ведущие зарубежные и отечественные исследователи.

К настоящему времени известны три метода моделирования трещин в железобетонных элементах сопротивляющихся срезу: модели дискретных трещин,

смазанных и встроенных [1]. Наиболее широкое применение получили первых два метода. Метод встроенных трещин начал развиваться сравнительно недавно.

В данной работе представлена модель, базирующаяся на положениях и уравнениях модифицированной теории полей сжатия (МСФТ) [3], которая в свою очередь, относится к моделям с размытыми трещинами. В моделях с размытыми трещинами бетон с трещинами рассматривается как непрерывный, и разрыв материала, вызванный трещиной, размазывается по элементу путем изменения угла наклона трещины, определяемого соблюдением условий, записанных в базовых уравнениях теории. Основные положения МСФТ детально изложены в работе [0].

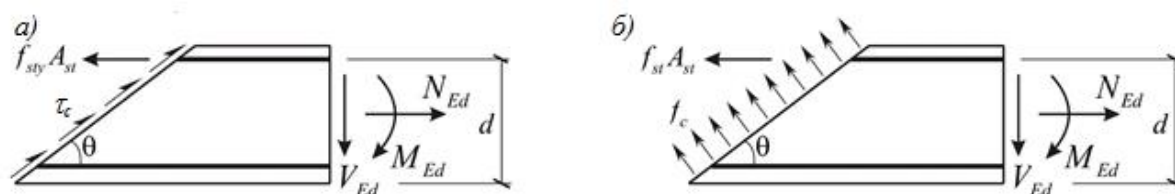
Основной целью данного исследования является верификация, оценка достоверности и точности разработанной модели.

Упрощенная модель сопротивления срезу при продавливании, разработанная на основе МСФТ в замкнутом виде (УМ МСФТ)

В основу разработанной модели положены следующие положения и допущения:

- после образования наклонной трещины бетон за ее пределами испытывает сжатие по направлению вдоль наклонной трещины и растяжение поперёк наклонной трещины;
- в расчетах используют средние значения главных растягивающих напряжений как функцию соответствующих относительных деформаций; в сечении, проходящем по наклонной трещине, они равняются нулю;
- в сечении, проходящем по наклонной трещине, действуют касательные напряжения, которые вызванные зацеплением контактирующих поверхностей бетона в трещине и зависят от степени шероховатости поверхностей;
- в расчетах используют постоянный угол наклона диагональной трещины, равный $\theta = 34,5^\circ$ [при расчетах по формулам (12), (14), (16)] и $\theta = 42^\circ$ [при расчетах по формулам (13), (15), (17)];
- горизонтальные усилия в арматуре и бетоне, возникающие в наклонной трещине и в теле бетона за её границами, уравниваются величиной $V_{Ed} \cot \theta$;
- в предельном состоянии наклонная трещина пересекает всю высоту конструктивного элемента, и сопротивление срезу при продавливании воспринимается касательными напряжениями τ_c , вызванными: зацеплением контактирующих поверхностей бетона в трещине; нагельным сопротивлением арматуры; сопротивлением бетона в сжатой зоне элемента;

Расчет выполняют непосредственно для предельной стадии сопротивления, минуя промежуточные этапы.



а) сечение, проведенное по наклонной трещиной;

б) сечение, проведенное за пределами наклонной трещины

Рисунок 1 – К составлению уравнений равновесия для построения упрощённой расчетной модели на основе МСФТ

Уравнения равновесия сил на оси X и Y для сечения за пределами наклонной трещине будут иметь вид:

$$\sum X = f_1 b_0 d + f_s A_s - V_{Ed,1} \cot \theta = 0; \quad (2)$$

$$\sum Y = f_1 b_0 d \cot \theta - V_{Ed,1} = 0; \quad (3)$$

в наклонной трещине:

$$\sum Y = V_{Ed,2} - \tau_c b_0 d = 0, \quad (4)$$

где f_l – главные растягивающие напряжения в бетоне; b_0 – длина критического периметра, расположенного на расстоянии l_s от наружных граней колонны; d – эффективная рабочая высота плиты, определяемая расстоянием от верхней сжатой грани в сечении плиты до центра тяжести растянутой арматуры; f_s – текущие напряжения в продольной арматуре; A_s – площадь продольной арматуры; V_{Ed} – обобщенная предельная поперечная сила, вызванная внешним воздействием на конструктивный элемент в зоне среза.

Из уравнения (3) получим:

$$V_{Ed,1} = f_1 b_0 d \cot \theta; \quad (5)$$

а из уравнения (4):

$$V_{Ed,2} = \tau_c b_0 d \quad (6)$$

Учитывая, что $V_{Ed,1}$ и $V_{Ed,2}$ должны быть эквивалентны, получим:

$$f_1 b_0 d \cot \theta = \tau_c b_0 d \Rightarrow f_1 = \tau_c \tan \theta. \quad (7)$$

Относительные продольные деформации в арматуре ε_x могут быть определены из выражения:

$$\varepsilon_x = \frac{f_s}{E_s} \Rightarrow f_s = \varepsilon_x E_s \quad (8)$$

Подставив выражения (6), (7) и (8) в уравнение (2), получим:

$$\tau_c b_0 d \tan \theta + \varepsilon_x E_s A_s - \tau_c b_0 d \cot \theta = 0 \Rightarrow \tau_c = -\frac{\varepsilon_x E_s \rho_l}{(\tan \theta - \cot \theta)}, \quad (9)$$

где $\rho_l = A_s / (b_0 \cdot d)$ – коэффициент продольного армирования.

С другой стороны, касательные напряжения τ_c в соответствии с положениями МСФТ зависят от прочности бетона при осевом сжатии f_{cm} и ширины раскрытия наклонной трещины w . Представим эту эмпирическую зависимость в виде:

$$\tau_c = \frac{a \cdot \sqrt{f_{cm}}}{b + c \cdot w}, \quad (10)$$

где a , b – поправочные эмпирические коэффициенты, которые следует принимать равными: $a = 0,21$ и $b = 0,307$; коэффициент $c = 250$ учитывает шероховатость контактирующих поверхностей бетона в трещине.

Ширина раскрытия наклонной трещины w на уровне центра тяжести растянутой продольной арматуры может быть определена из выражения:

$$w = \psi d \quad (11)$$

где величина угла поворота наклонного сечения может быть определена по упрощенной зависимости:

$$\psi = \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_s}{E_s} = \frac{r_s}{d} \cdot \varepsilon_x \quad (12)$$

или на втором уровне аппроксимации угла поворота с учётом изгиба:

$$\psi = \frac{r_s}{d} \cdot \frac{f_s}{E_s} \left(\frac{m_{Ed}}{m_{Rd}} \right)^{1,5} = \frac{r_s}{d} \cdot \varepsilon_x \left(\frac{m_{Ed}}{m_{Rd}} \right)^{1,5} \quad (13)$$

где f_s – текущие напряжения в продольной растянутой арматуре, которые для упрощения могут быть приняты равными пределу текучести арматуры f_y .

Подставив выражения (11) и (12) в уравнение (10), получим:

$$\tau_c = \frac{a \cdot \sqrt{f_{cm}}}{b + c \cdot r_s \cdot \varepsilon_x} \quad (14)$$

$$\tau_c = \frac{a \cdot \sqrt{f_{cm}}}{b + c \cdot r_s \cdot \varepsilon_x \left(\frac{m_{Ed}}{m_{Rd}} \right)^{1,5}}$$

или

$$\quad (15)$$

Приравнивание выражений (9) и (13) и решение квадратного уравнения даст величину ε_x на уровне центра тяжести растянутой арматуры в виде:

$$\varepsilon_x = -\frac{b}{2 \cdot c \cdot r_s} + \frac{\sqrt{\rho_l E_s \cdot [b^2 \rho_l E_s - 4 \cdot a \cdot c \cdot r_s \cdot \sqrt{f_{cm}} \cdot (\operatorname{tg} \theta - \operatorname{ctg} \theta)]}}{2 \cdot \rho_l E_s \cdot c \cdot r_s} \quad (16)$$

или

$$\varepsilon_x = -\frac{b}{2 \cdot c \cdot r_s \left(\frac{m_{Ed}}{m_{Rd}} \right)^{1,5}} + \frac{\sqrt{\rho_l E_s \cdot [b^2 \rho_l E_s - 4 \cdot a \cdot c \cdot r_s \cdot \sqrt{f_{cm}} \cdot (\operatorname{tg} \theta - \operatorname{ctg} \theta)]}}{2 \cdot \rho_l E_s \cdot c \cdot r_s \left(\frac{m_{Ed}}{m_{Rd}} \right)^{1,5}} \quad (17)$$

Расчет можно вести в следующей последовательности: определить ε_x по выражению (16) или (17); определить τ_c по выражению (14) или (15); определить величину сопротивления срезу при продавливании по выражению (6).

Верификация расчетной модели. Верификация разработанной расчётной модели сопротивления срезу при продавливании выполнена на фоне доступной базы экспериментальных данных, которая включила результаты 250 испытаний опытных образцов плит на сопротивление срезу при продавливании, выполненных зарубежными и отечественными исследователями, а также результаты собственных исследований.

Таблица 2 – Сравнительные статистические параметры отношений V_{exp} / V_{calc} экспериментальных V_{exp} и расчетных V_{calc} сопротивлений срезу при продавливании

Нормативный документ	Min	Среднее	Max	σ	C_v , %	b	V_δ , %	r_{ik}
УМ МСФТ-1	0,644	0,975	1,579	0,158	16,2	1,013	16,2	0,984
УМ МСФТ-2	0,276	1,1	1,893	0,216	19,6	0,994	18,3	0,983

Сравнительные статистические параметры отношений V_{exp} / V_{calc} :

УМ МСФТ-1 – расчёт по формулам (12), (14), (16)]; УМ МСФТ-2 – расчет по формулам (13), (15), (17); *Min*, среднее, *max* – соответственно минимальное, среднее и максимальное значения; σ – стандартное отклонение; C_v – коэффициент вариации; b – поправочный коэффициент для среднего значения; V_δ – коэффициент вариации для вектора ошибок δ ; r_{ik} – коэффициент корреляции экспериментальных V_{exp} и расчетных V_{calc} сопротивлений срезу при продавливании.

Статистические параметры ошибки моделирования были определены согласно процедуре, описанной в приложении Д к ТКП EN 1990 [5]. Качество модели определяли оценочными статистическими параметрами (оценочным средним, стандартным отклонением, коэффициентом вариаций), полученными для отношений экспериментальных и расчетных значений анализируемого сопротивления V_{exp} / V_{calc} , а также коэффициентом корреляции r_{ik} экспериментального и расчетного значений

сопротивления срезу при продавливании (таблица 1). При этом среднее значение отношения V_{exp} / V_{calc} должно быть близко к единице при минимальном значении коэффициента вариаций. Использование указанных математических статистик в данном случае оправдано, так как распределение отношений V_{exp} / V_{calc} очень близко к нормальному распределению.

Заключение. Из сравнительного анализа статистических параметров (таблица 2) следует, что наиболее точной можно считать разработанную УМ МСFT-1, которая обладает достаточно близким к единице средним значением отношений V_{exp} / V_{calc} (0,975), наименьшими из анализируемых моделей: размахом данных, стандартным отклонением ($\sigma = 0,158$), коэффициентом вариации отношений V_{exp} / V_{calc} ($C_v = 16,2\%$), коэффициентом вариации вектора ошибок δ ($V_\delta = 16,2\%$), отклонение от единицы поправочного коэффициента для среднего значения отношений V_{exp} / V_{calc} (1,3%). При этом коэффициент корреляции значений V_{exp} и V_{calc} наиболее близок к единице ($r_{ik} = 0,984$).

Список использованных источников:

1. Menin, R.C.G. Smeared Crack Models for Reinforced Concrete Beams by Finite Element Method / R.C.G. Menin, L.M. Trautwein, T.N. Bittencourt // *Ibracon Structures Materials Journal*. – Volume 2, Number 2 (June, 2009), p. 166 – 200.
2. Тур В.В. Новые подходы к определению сопротивления срезу балочных элементов без поперечного армирования: часть 1 – обзор расчетных моделей / В. В. Тур, А. П. Воробей // *Вестник БрГТУ*. – 2019. №1 : Строительство и архитектура. – С.15-22.
3. Vecchio, F. J. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear / F. J. Vecchio, M. P. Collins // *ACI Journal Proceedings*. – 1986. – Vol. 83, iss. 2. – P. 219-231.
4. Тур В.В. Кондратчик А.А. Расчет железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил// Брест, БГТУ.– 2000.– 400 с.
5. Основы проектирования строительных конструкций = Основы проектирования будаунических канструкций : ТКП EN 1990-2011. – Введ. 15.11.2012. – Минск : СЕН/ТС 250 «Конструкционные Еврокоды» : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2011. – 70 с.

Сальникова С.Р., Сопин Ю.Ю.

МЕТОДЫ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИЯХ

Брестский государственный технический университет, ст. преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции

Сегодня встала необходимость организовать обеззараживание воздуха в помещениях массового скопления людей. Организация воздухообмена, очистки и дезинфекции воздуха — один из методов профилактики распространения инфекционных заболеваний с аэрогенным механизмом передачи. Выделяясь из дыхательных путей источника инфекции, бактерии и вирусы попадают в воздушную среду и в дыхательные пути восприимчивого человека. В данной цепочке воздух — фактор передачи, который при определенных условиях (замкнутые пространства, перетекание потоков воздуха из одного помещения в другое, высокая скученность