

6. Panarin, N. Ya. Zhelezobetonny`e konstrukczii / N. Ya. Panarin, A. P. Pavlov, N. M. Onufriev. – M.: Vy`sshaya shkola, 1971. – 554 s.

7. Zhelezobetonny`e sborny`e nesushhie konstrukczii dlya pokry`tij s rulonnoj krovlej. Balki napryazhenno-armirovanny`e czel`ny`e stendovogo izgotovleniya dlya proletov 9, 12, 15, 18 m so sterzhnevoj armaturoj : seriya PK-01-06. Vy`pusk 1. – M.: CzITP Gosstroya USSR, 1957. – 67 s.

8. Zhelezobetonny`e dvutavrovyy`e balki proletom 18 m dlya malouklonny`kh pokry`tij pro-my`shlenny`kh zdaniy : seriya 1.462.1-16. – M. : CzITP Gosstroya USSR, 1984. – 22 s.

9. Balki stropil`ny`e zhelezobetonny`e dvutavrovyy`e proletom 15 m dlya pokry`tij odno-e`tazhny`kh promy`shlenny`kh predpriyatij : seriya 1.462.1-23. – M. : CzNIIPROMZDA-NIJ, 1992. – 41 s.

10. Balki stropil`ny`e zhelezobetonny`e dvutavrovyy`e proletom 21 m dlya pokry`tij odno-e`tazhny`kh promy`shlenny`kh predpriyatij : seriya 1.462.1-24. – M. : CzNIIPROMZDA-NIJ, 1992. – 32 s.

11. Balki dvuskatny`e tipa «Bumerang» dlya pokry`tij sel`skokhozyajstvenny`kh proizvod-stvenny`kh zdaniy. Rabochie chertezhi. Opy`tnaya partiya : seriya B1.862.1-DB. Vy`pusk 3. – Minsk : Institut BelNIIS, 2013. – 23 s.

УДК 624.046.5

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛНОСВЯЗНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ В РАСЧЁТАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ СРЕЗУ ПРИ ПРОДАВЛИВАНИИ ПЛОСКИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ПЕРЕКРЫТИЙ БЕЗ ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРЫ

В.В. Молош¹, А.Е. Желткович², К. Пархоц³, Н.Г. Совеико⁴, И.Г. Томашев⁵

¹*К.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной механики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: m.vic@rambler.ru*

²*К.т.н., доцент, доцент кафедры прикладной механики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: gelpek@mail.ru*

³*Инженер программист, Беларусь, e-mail: konstantinparhoc@gmail.com.*

⁴*Programmer engineer, Belarus, e-mail: nick-2009@live.ru.*

⁵*Магистр технических наук, старший преподаватель кафедры прикладной механики УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: tomashev@mail.ru*

Реферат

Соппротивление срезу при продавливании железобетонных плит перекрытий представляет собой один из наиболее сложных видов сопротивления железобетонных конструкций, так как имеет хрупкую форму разрушения с мгновенным отделением плиты от колонны, Точность оценивания сопротивление срезу при продавливании имеет в проектировании железобетонных конструкций ключевое значение. Несмотря на то, что экспериментальные и теоретические исследования сопротивления срезу при продавливании ведутся уже более ста лет, единой и достоверной расчётной модели к настоящему времени не разработано.

Это объясняется сложностью напряжённо-деформированного состояния, возникающего под нагрузкой в узле соединения плиты перекрытия и колонны. Для оценки сопротивления срезу при продавливании наибольшее распространение получили полуэмпирические и полностью эмпирические расчётные модели в силу своей простоты и конкурентной точности предсказания. В данной работе исследуется моделирование сопротивления срезу при продавливании с помощью полносвязной нейронной сети, рассматриваемой в качестве аналитической альтернативы существующим расчётным моделям. Используя базу данных, собранную из многочисленных экспериментальных работ, была выполнена оценка достоверности существующих расчётных моделей, введённых в некоторые действующие нормативные документы и предсказаний сопротивления срезу при продавливании, полученных с помощью нейронной сети. Полученные с применением нейронной сети значения сопротивления срезу при продавливании были точнее, чем сделанные с помощью рассмотренных в данной работе расчётных моделей.

Ключевые слова: железобетон; сопротивление срезу при продавливании; нейронная сеть; оценка достоверности расчётной модели.

APPLICATION OF A NEURAL NETWORK IN CALCULATIONS OF PUNCHING SHEAR CAPACITY THROUGH FLAT SLABS OF REINFORCED CONCRETE SLABS WITHOUT TRANSVERSE REINFORCEMENT

V.V. Molosh¹, A.P. Zheltkovich², K. Parchotz³, N. Saveiko⁴, I.G. Tomashev⁵

Abstract

The punching shear capacity of reinforced concrete floor slabs is one of the most difficult kinds of resistance of reinforced concrete structures because it has the brittle form of destruction with the instantaneous separation of the slab from the column. The accuracy of punching shear capacity estimation has the key importance for the design of reinforced concrete structures. In spite of the fact that experimental and theoretical researches of shear resistance under punching have been carried out for more than a hundred years, a unified and reliable calculation model hasn't been worked out yet. This can be explained by the complexity of the stress-strain state which occurs under load at the junction of the floor slab and the column. Semiempirical and fully empirical computational models are most commonly used to estimate punching shear capacity because of their simplicity and competitive prediction accuracy. This paper investigates the modeling of punching shear resistance using a fully coupled neural network, considered as an analytical alternative to existing computational models. Using a database compiled from numerous experimental works, the validity of existing calculation models introduced in some existing regulatory documents and punching shear capacity predictions obtained with a neural network has been evaluated. The punching shear capacity values obtained by using a neural network were more accurate than those obtained by using the calculation models discussed in this paper.

Keywords: reinforced concrete; punching shear resistance; neural network; evaluation of reliability of calculation model.

Введение.

В конструкциях перекрытий современных жилых и общественных зданий, парковочных станций часто используются плоские железобетонные плиты, имеющие простую экономически эффективную конструктивную форму, удобную для инженерной реализации и архитектурного планирования. Их плоская форма значительно облегчает установку арматуры и опалубки и часто позволяет уменьшить общую высоту этажа. Указанные преимущества плоских плит привели к возникновению большого количества экспериментальных и теоретических исследований, направленных на изучение сопротивления плоских железобетонных плит срезу при продавливании. Согласно [1] предельное состояние плоской железобетонной плиты может быть определено максимальной величиной сопротивления срезу при продавливании, возникающему в узле соединения плиты и колонны. Такое разрушение приводит к значительному снижению сопротивления плиты в целом и во многих случаях к прогрессирующему обрушению перекрытий, ведущих к значительным экономическим потерям, а в ряде случаев к гибели людей. Для предотвращения подобных обрушений задача определения сопротивления срезу при продавливании плоских железобетонных плит достаточно широко изучается современными исследователями. Разработанные к настоящему времени модели сопротивления срезу при продавливании, вошедшие в некоторые нормативные документы [5], а также в отечественные нормы [2], являются эмпирическими. Полуэмпирическая модель, реализованная на базе теории критической наклонной трещины *CSCT* (англ. *Critical Shear Crack Theory – CSCT*), разработанной в последние двадцать лет и опубликованной в полном объеме в работе [6], принята *fib* MC2010 [4]. В свою очередь теория критической наклонной трещины является развитием концепции модифицированной теории полей сжатия (MCFT) [7]. Существует достаточно большое количество полуэмпирических моделей сопротивления срезу при продавливании плоских железобетонных плит, не получивших широкого распространения и не вошедших в нормативные документы в связи с чем они не рассматривались в данной работе.

Отсутствие адекватных и надежных эмпирических или аналитических моделей сопротивления срезу при продавливании, в последние десятилетия привлекло к решению данной задачи исследователей, занимающихся недетерминированными методами.

В течение последних десяти лет значительно возросло применение нейронных сетей и машинного обучения в прогнозировании сложных процессов и явлений [8 - 10].

В данной работе выполнена статистическая оценка достоверности значений сопротивления срезу при продавливании, полученных с помощью нейронной сети, рассматриваемой в качестве альтернативы существующим расчётным моделям, и моделей, принятых в нормативных документах [2-5]. С этой целью была собрана база данных, включающая результаты экспериментальных исследований зарубежных и отечественных авторов.

1 Нейронная сеть

Для моделирования сопротивления срезу при продавливании использовали нейронную сеть с полносвязной архитектурой прямого распространения, в кото-

рой каждый нейрон связан со всеми остальными нейронами, находящимися в соседних слоях, и в которой все связи направления строго от входных нейронов к выходным (рисунок 1) [12].

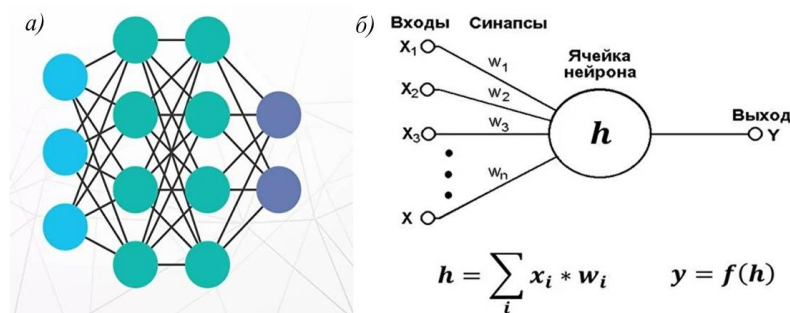


Рисунок 1 – Архитектура полносвязной нейронной сети в общем виде (а) и математическая модель нейрона Маккаллока-Питтса (б)

Слева на рисунке 1а представлен входной слой, на который приходит сигнал. Правее находятся два скрытых слоя, и самый правый слой из двух нейронов – выходной слой.

В нашем случае каждый сигнал, приходящий на нейрон входного слоя, представлял собой величину варьируемого базового параметра, влияющего на сопротивление срезу при продавливании. В выходном слое был всего один нейрон, представляющий величину сопротивление срезу при продавливании в виде предельной перерезающей силы, обозначенной V_{calc} .

Модель искусственного, математического нейрона Маккаллока-Питтса, разработанную по аналогии с нервными клетками, представлена на рисунке 1б.

В математических нейронах используются следующие обозначения: X – входные данные W – веса; h – тело нейрона; Y – выход нейронной сети.

Входные данные – сигналы, поступающие к нейрону, передаются нейронам следующего слоя, с помощью весов –эквивалентов синаптической связи и выброса нейромедиатора у живых организмов, представленный в виде чисел, в том числе отрицательных. Вес представлен действительным числом, на которое будет умножено значение входящего в нейрон сигнала и показывает, насколько сильно между собой связаны те или иные нейроны – это коэффициент связи между ними. В теле нейрона накапливается взвешенная сумма от перемножения значений входящих сигналов и весов. В качестве функции активации нейрона, определяющей значение выходного сигнала, была принята функция ReLu, которая работает следующим образом: если значение взвешенной суммы в теле нейрона отрицательно, то идет преобразование в 0, а если положительно, то в значение X (значение сигнала). Процесс обучения нейронной сети – это процесс изменения весов, т.е. коэффициентов связи между имеющимися в ней нейронами. В процессе обучения веса меняются, и, если вес положительный, то идет усиление сигнала в нейроне, к которому он приходит. Если вес нулевой, то влияние одного нейрона на другой отсутствует. Если же вес отрицательный, то идет погашение сигнала в принимающем нейроне. На выходе нейронной сети приходят результаты обработки нейроном поданного на него сигнала в виде некой функции от накопившейся в теле нейрона взвешенной суммы.

Обучение полносвязной нейронной сети происходит методом обратного распространения ошибки, суть которого заключается в обновлении весов нейронной сети, при котором распространение сигналов ошибки происходит от выходов сети к её входам, в направлении, обратном прямому распространению сигналов в обычном режиме работы.

Нейронная сеть была реализована с помощью открытой программной библиотеки для машинного обучения TensorFlow, разработанной компанией Google для решения задач построения и тренировки нейронной сети.

2. Модели сопротивления срезам при продавливании, принятые в нормативных документах ТКП EN 1992-1-1-2009 [2], prEN 1992-1-1:2018 [3], fib MC 2010 [4], ACI 318R-02 [5]

В основу расчетных моделей, принятых в нормативных документах, положено следующее условие:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c} \quad (1)$$

где V_{Ed} – обобщенная перерезывающая сила, вызванных внешними воздействиями на конструкцию; $V_{Rd,c}$ – обобщенная внутренняя реакция конструкции на внешнее воздействие, направленная вдоль оси действия V_{Ed} .

Основные уравнения сопротивления срезам при продавливании плоских железобетонных плит без поперечной арматуры, вошедшие в расчетные модели нормативных документов ТКП EN 1992-1-1-2009 [2], prEN 1992-1-1:2018 [3], fib MC 2010 [4], ACI 318R-02 [5] приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Уравнения моделей сопротивления срезам при продавливании, используемые в нормативных документах [2, 3, 4, 5]

Норм. док.	Расчетные уравнения	
ТКП EN 1992-1-1-2009 [2]	$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right] \frac{b_w \cdot d}{\beta} ; \quad V_{Rd,c} \geq (v_{\min} + k_1 \sigma_{cp}) \frac{b_w \cdot d}{\beta} ;$	Основные
	$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} ; \quad v_{\min} = 0,035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} ; \quad k_1 = 0,1$ $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \quad (d \text{ в мм}); \quad d = (d_x + d_y) / 2; \quad \sigma_{cd} = (\sigma_{cd,x} + \sigma_{cd,y}) / 2;$ $\rho_l = \sqrt{\rho_{lx} \cdot \rho_{ly}} \leq 0,02, \quad \text{где } 0,002 \leq \rho_l \leq 0,02;$ $l_s = 1,5d = d \cot \theta ; \quad \theta = 45^\circ ; \quad \bar{\beta} = 1,15 \quad \text{для внутренних колонн.}$	Дополнительные
prEN 1992-1-1:2002 [3]	$V_{Rd,c} = \frac{0,6}{\gamma_c} \cdot k_{pb} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d_v} \right)^{1/3} \cdot \frac{b_0 d_v}{\beta_e} ; \quad V_{Rd,c} \leq \frac{0,6}{\gamma_c} \sqrt{f_{ck}} ;$ $V_{Rd,c,\min} \leq \frac{10}{\gamma_c} \sqrt{\frac{f_{ck}}{f_{yd}} \cdot \frac{d_{dg}}{d_v}} .$	Основные

Продолжение таблицы 1

	$k_{pb} = \sqrt{5\mu_p \frac{d_v}{b_0}} \leq 2,5; \quad \mu_p = 8 \text{ для внутренних колонн}$ $d_v = \frac{(d_{vx} + d_{vy})}{2} \quad \text{при} \quad 0,5 \leq \frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}} \leq 2; \quad \rho_l = \sqrt{\rho_{lx} \cdot \rho_{ly}};$ $d_{dg} = 16 + D_{lower} \leq 40 \text{ мм при } f_{ck} \leq 60 \text{ МПа};$ $d_{dg} = 16 + D_{lower} \left(\frac{60}{f_{ck}} \right)^2 \leq 40 \text{ мм при } f_{ck} > 60 \text{ МПа};$ $\beta_e = 1,15 \text{ для внутренних колонн}; \quad l_s = 0,5d; \quad \theta = 45^\circ$	Дополнительные
fib MC 2010 [4]	$V_{Rd,c} = k_\psi \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0 d; \quad V_{Rd,max} = k_{sys} \cdot k_\psi \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0 \cdot d \leq \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} b_0 \cdot d$	Основные
	$k_\psi = \frac{1}{1,5 + 0,9\psi d k_{dg}} \leq 0,6; \quad k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75$ $\psi = 1,5 \frac{r_s}{d} \frac{f_{yd}}{E_s};$ <p>Первый уровень:</p> $\psi = 1,5 \frac{r_s}{d} \frac{f_{yd}}{E_s} \left(\frac{m_{Ed}}{m_{Rd}} \right)^{1,5};$ <p>Второй уровень:</p> $m_{Ed} \cong V_{Ed} / 8 \text{ – для внутренних колонн}; \quad l_s = 0,5d; \quad \theta = 45^\circ$	Дополнительные
ACI 318R-02 [5]	$V_c = v_c \cdot u \cdot d; \quad l_s = 0,5d; \quad \theta = 45^\circ;$ $v_c = \min \begin{bmatrix} 0,332 \cdot \sqrt{f_c}; \\ 0,083 \cdot \sqrt{f_c} \cdot (2 + 4 / \beta_c) \\ 0,083 \cdot \sqrt{f_c} \cdot (2 + \alpha_s \cdot d / u) \end{bmatrix}$	Основные
<p>В таблице приняты следующие обозначения:</p> <p>$\bar{\beta}$, β_e – коэффициент, учитывающий влияние внецентренного приложения нагрузки, принимается в соответствии с положениями [1,];</p> <p>d, d_v – эффективная рабочая высота плиты, определяемая расстоянием от верхней сжатой грани в сечении плиты до центра тяжести растянутой арматуры;</p> <p>d_{g0} – базовый размер зерна крупного заполнителя, равный 16 мм;</p> <p>d_g, D_{lower} – максимальный размер зерна крупного заполнителя, применяемого для приготовления бетонной смеси;</p> <p>d_{dg} – параметр, учитывающий шероховатость поверхности разрушения, принимаемый в зависимости от типа бетона и величины крупного заполнителя;</p> <p>u, b_0, b_w – длина критического периметра, расположенного на расстоянии l_s от наружных граней колонны;</p> <p>V_{Ed} – обобщенная предельная поперечная сила, вызванная внешним воздействием на конструктивный элемент в зоне среза;</p> <p>$V_{Rd,c}$ – сопротивление срезу при продавливании;</p> <p>v_{Sd}, v_c – внешняя поперечная сила, распределенная по площади критического сечения;</p> <p>ρ_l – коэффициент продольного армирования;</p> <p>f_{ck} – нормативное сопротивление бетона осевому сжатию, МПа;</p> <p>f_c' – среднее сопротивление бетона осевому сжатию, МПа;</p> <p>σ_{cd} – средние напряжения обжатия в плите на уровне нейтральной плоскости, МПа;</p>		

<p>f_{ctd} – расчетное сопротивление бетона осевому растяжению, МПа; l_s – длина зоны среза в плите перекрытия; θ – угол наклона граней пирамиды (конуса) продавливания; f_{yk} – нормативное сопротивление арматуры осевому растяжению, соответствующее пределу текучести, МПа; f_{yd} – расчетное сопротивление арматуры осевому растяжению, МПа; r_s – расстояние от оси колонны до сечения, в котором изгибающий радиальный момент равен нулю; ψ – угол поворота плоскости плиты в сечении у основания наклонной трещины; k_{dg} – коэффициент, зависящий от максимального размера зерна крупного заполнителя; если $d_g \geq 16$ мм, $k_{dg} = 1,0$; E_s – модуль упругости арматурной стали; m_{Ed} – среднее значение расчетного изгибающего момента на единицу длины опорной полосы в районе колонны; m_{Rd} – расчетный погонный изгибающий момент в сечении плиты в зоне соединения с колонной; β_c – соотношение длин сторон колонны; $\alpha_s = 40$ – для колонны в центре плиты, 30 – на краю плиты, 20 – на углу плиты.</p>

3 База экспериментальных данных

Оценивание результатов расчёта сопротивления срезу при продавливании, полученных по моделям, использованным в нормативных документах, и с применением нейронной сети, было выполнено опираясь на экспериментальные данные доступной базы, включающей результаты испытаний образцов-плит с разными геометрическими, физико-механическими характеристиками и значениями предельных перерезывающих сил. В оценивании использовались взятые из доступных литературных источников данные 265 экспериментальных образцов, испытанных зарубежными и отечественными авторами. Частично экспериментальные данные, использованные в оценке достоверности расчётной модели, приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Границы экспериментальных данных и результатов испытаний опытных образцов на сопротивление срезу при продавливании

Наименования параметра	Границы варьирования
Авторы экспериментальных исследований	Hallgren, Tomas, Ramdane, Marz/Hsu, Tolf, Regan, Swamy/Ali, ETH, Schaefers, Lander, Hawkin, -Base, Manterola, Yitzhaki, Moe, Kinnunen, Nylander, Elstner, Hognestad, Scordelis, Lin, Молош.
Размеры экспериментальной плиты $a \times b$, м	0,3÷6
Высота плиты h , м	0,036÷0,32
Форма колонны	круг, квадрат, прямоугольник
Размеры колонны, $a_k \times b_k$, м	0,0254÷0,5
Рабочая высота плиты d , м	0,02÷0,275
Сопротивление бетона осевому сжатию f_c' , МПа	9,1÷118,7
Модуль упругости бетона E_c , МПа	21200÷51800
Коэффициент продольного армирования ρ_l	0,0015÷0,069
Сопротивление арматуры осевому растяжению f_s , МПа	255÷1335,5
Модуль упругости арматуры E_s , ГПа	171,7÷214
Предельное значение V_{exp} , МН	0,016÷2,45

3 Оценка достоверности расчетной модели

Качество расчётных моделей было проверено путём оценивания отношений экспериментальных и расчётных значений перерезывающих сил V_{calc} / V_{exp} : средним, максимальным, минимальным значениями и коэффициентом вариаций отношений. Об адекватности функциональной взаимосвязи между расчётными и экспериментальными перерезывающими силами также сделали вывод на основании величины коэффициентом корреляции r_{ik} , поправочного коэффициента b для среднего значения отношений V_{exp} / V_{calc} и коэффициента вариации V_{δ} вектора ошибок δ , рассчитанных в соответствии с положениями стандартной процедуры, изложенной в приложении Д к ТКП EN 1990 [11].

Наиболее точные значения сопротивлений срезу при продавливании были получены с применением нейронной сети, что наглядно отражено на графиках, приведенных на рисунках 2 и 3, а также посредством показателей таблицы 2. Линия тренда, характеризующая расположение средних значений отношений V_{calc} / V_{exp} во всём диапазоне изменения базисных переменных, показывает отклонение в среднем на 1%, что, как видно из рисунка 3д, происходит за счёт изменения коэффициента продольного армирования.

Остальные анализируемые модели показывают отклонение в сторону превышения, как например, модель *fib* MC 2010 [4] (показывает превышение на 18,5 %), или в сторону занижения, как например модели ТКП EN 1992-1-1-2009 [2] (на 42,5 %), prEN 1992-1-1:2002 [3] (на 12 %), ACI 318R-02 [5] (на 34 %).

В тоже время все модели, включая и нейронную сеть, показывают достаточно большой размах отношений сопротивлений V_{calc} / V_{exp} , представляющий разницу между максимальным и минимальным значениями отношений. Наименьший размах, около 47 %, показывает модель ТКП EN 1992-1-1-2009 [2]. Остальные модели показывают размах от 75 % (ACI 318R-02 [5]) и выше (нейронная сеть – 96 %, prEN 1992-1-1:2002 [3] – 118 %, *fib* MC 2010 [4] – 133 %) (таблица 2).

По остальным статистическим показателям наилучшие результаты показала нейронная сеть (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнительные статистические параметры отношений расчётных и экспериментальных значений перерезывающих сил V_{calc} / V_{exp}

Результаты	<i>Min</i>	Среднее	<i>Max</i>	C_v , %	<i>b</i>	V_{δ} , %	r_{ik}
Нейросеть	0.521	1.007	1.484	12,1	1.004	12,5	0.995
ТКП EN 1992-1-1-2009 [2]	0.334	0.575	0.802	16,9	1.647	17,7	0.984
prEN 1992-1-1:2002 [3]	0.471	0.882	1.658	21,2	1.3	20,8	0.967
<i>fib</i> MC 2010 [4]	0.607	1.186	1.971	23,1	0.842	23	0.964
ACI 318R-02 [5]	0.336	0.663	1.091	23,2	1.517	23,2	0.963

Min, среднее, *max* – соответственно минимальное, среднее и максимальное значения отношений V_{calc} / V_{exp} ; C_v – коэффициент вариации отношений V_{calc} / V_{exp} ; *b* – поправочный коэффициент для среднего значения отношений V_{calc} / V_{exp} ; V_{δ} – коэффициент вариации для вектора ошибок δ отношений V_{calc} / V_{exp} ; r_{ik} – коэффициент корреляции экспериментальных V_{exp} и расчётных V_{calc} перерезывающих сил.

Наименьшую чувствительность на влияние базовых параметров сопротивления срезу при продавливании, к которым традиционно принято относить рабочую высоту плиты d , сопротивление бетона осевому сжатию f_{cm} и коэффициент продольного армирования ρ_l , показала нейронная сеть (рисунок 3). Она оказалась в среднем практически не чувствительна к изменению сопротивления бетона осевому сжатию и рабочей высоты плиты и лишь в небольшой мере чувствительна к изменению коэффициента продольного армирования. Остальные модели в той или иной степени были чувствительны ко всем базовым параметрам. Причём менее всего – к изменению сопротивления бетона осевому сжатию f_{cm} , а более всего – к изменению коэффициента продольного армирования ρ_l .

Заключение

Проведённые в течение периода осознанного применения железобетона многочисленные экспериментальные и теоретические исследования сопротивления срезу при продавливании плоских железобетонных плит не позволили оценить и понять в полной мере физическую и механическую суть явления среза при продавливании, и, следовательно, разработать единую и достоверную расчётную модель. Это объясняется сложностью напряжённо-деформированного состояния, возникающего под нагрузкой в узле соединения плиты перекрытия и колонны.

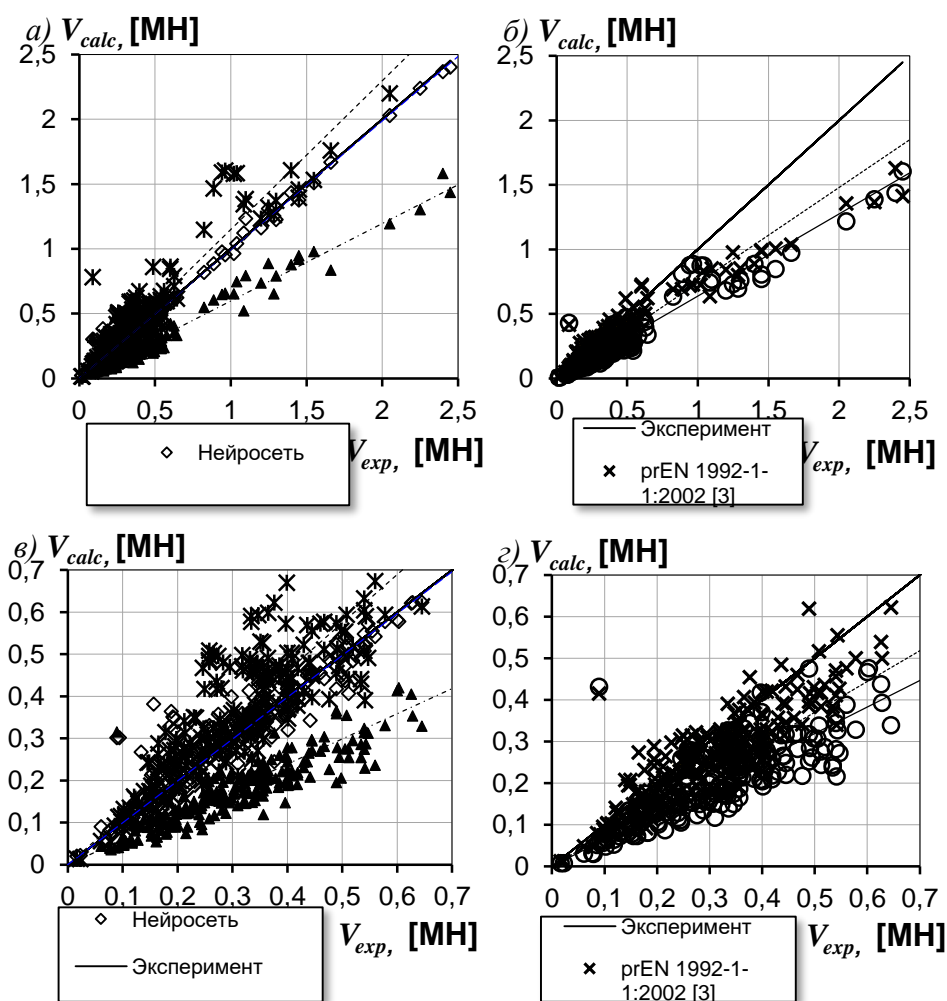
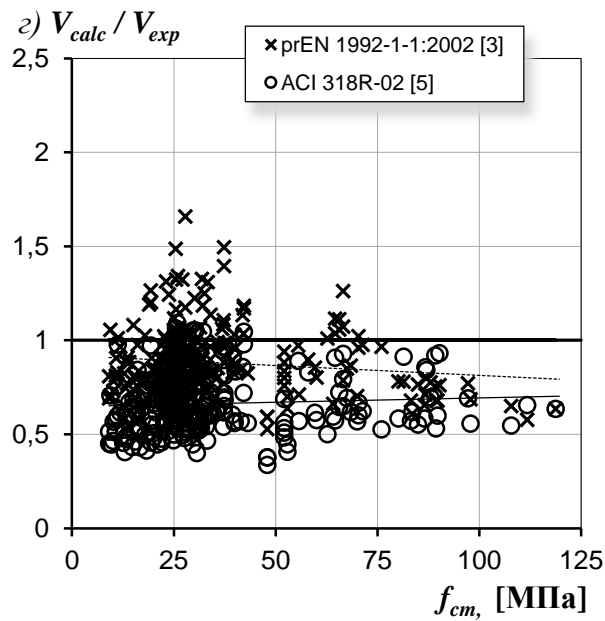
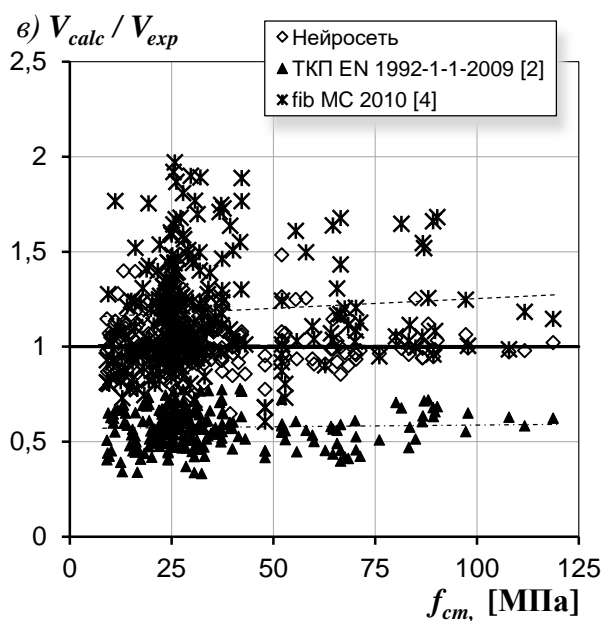
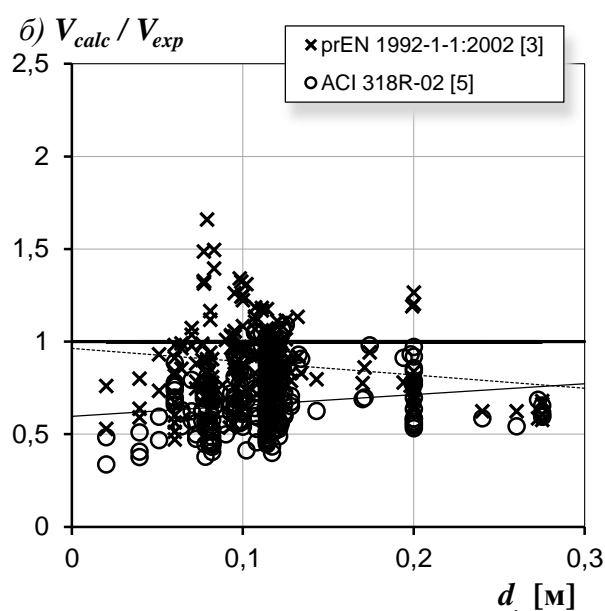
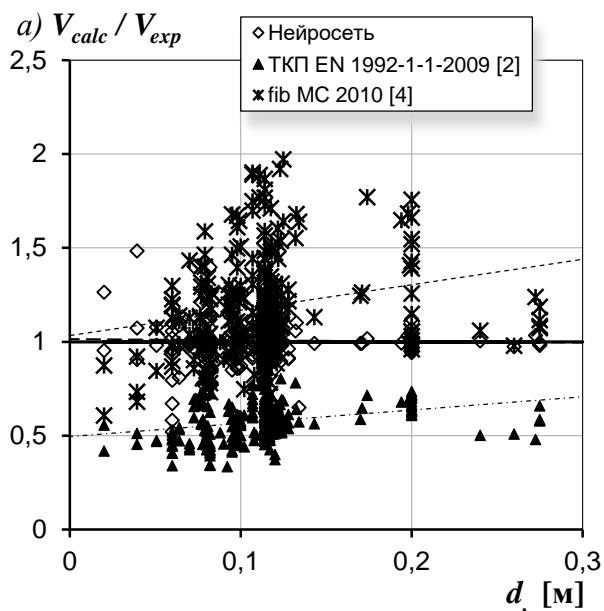


Рисунок 2 – Соотношение расчётных V_{calc} и экспериментальных V_{exp} значений перерезывающих сил для всего оценочного диапазона данных (а, в) и в диапазоне $0 \div 0,7$ МН (б, г)

В настоящее время для оценки сопротивления срезу при продавливании наибольшее распространение получили полуэмпирические и полностью эмпирические расчётные модели, обладающие простой математической формой, и, следовательно, доступностью применения при проектировании.

Предсказанные с применением нейронной сети значения сопротивлений срезу при продавливании для рассмотренных в данной работе моделей имеют наилучшую корреляцию с экспериментальными значениями сопротивлений.

Причины большого разброса отношений расчётных и экспериментальных сопротивлений срезу при продавливании V_{calc} / V_{exp} , полученного для всех моделей, включая нейронную сеть, могут заключаться не только в недостатках самих расчётных моделей, но и в неточностях, касающихся интерпретаций, изложений, измерений, измерительных приборов и т.д., а также передачи через литературные источники результатов экспериментальных исследований.



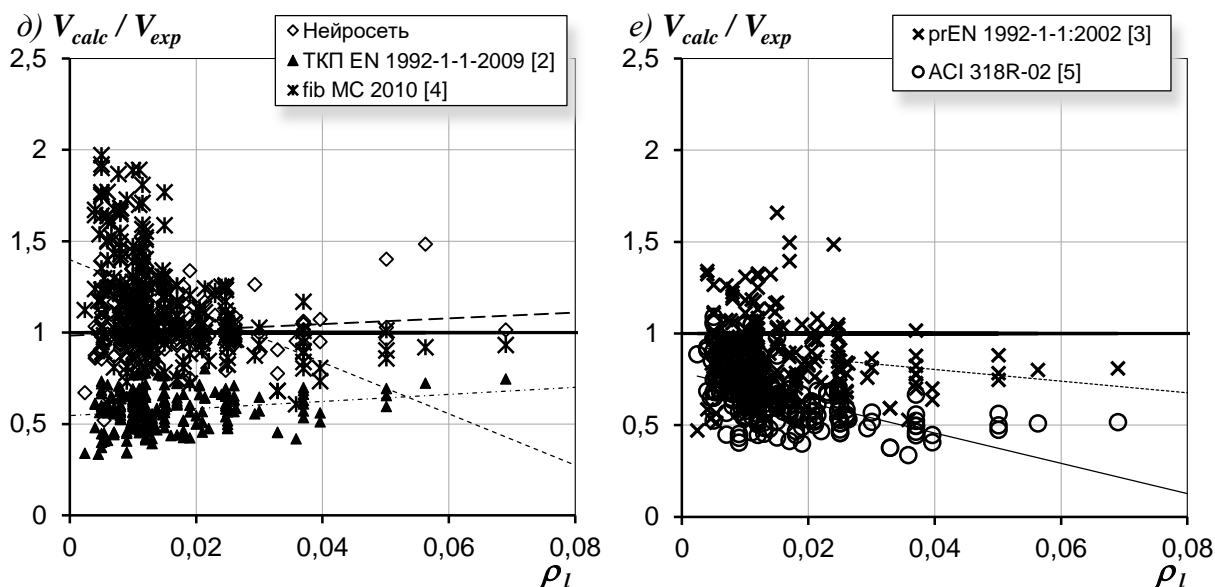


Рисунок 4 – Изменение отношений расчётных и экспериментальных значений сопротивления срезу при продавливании V_{calc} / V_{exp} в зависимости от величины рабочей высоты плиты d (а, б), средней прочности бетона при осевом сжатии f_{cm} (в, г) и коэффициента продольного армирования ρ_l (д, е)

Следует признать, что любые модели сопротивления срезу при продавливании, включая нейронные сети, полученные посредством аппроксимации экспериментальных значений сопротивления методом подгона, несмотря на достаточно высокую корреляцию этих значений, нельзя считать в полной мере адекватными. Эти модели не базируются на общепринятых постулатах фундаментальных научных законов, полученных к настоящему времени в механике и физике, и поэтому их можно считать весьма спорными. Кроме того, они требуют весьма щепетильного подхода к точности проведения экспериментальных исследований и идентификации их результатов. Количество и ширина охвата всех возможных комбинаций базовых параметров должна быть максимальной, что нельзя считать выполнимым в полной мере в настоящее время.

Список цитированных источников

1. Fernández Ruiz, M. Post-punching behavior of flat slabs / M. Fernández Ruiz, Y. Mirzaei, A. Muttoni // ACI Struct. J. – 2013, Vol. 110. – P. 801–812.
2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий = Праектаванне жалезабетонных канструкцый. Частка 1-1. Агульныя правілы і правілы для будынкау : ТКП EN 1992-1-1-2009. – Введ. 10.12.2009. – Минск : СЕН/ТС 250 «Еврокоды конструкций» : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2009. – 207 с.
3. Design of concrete structures – Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures : prEN 1992-1-1:2018 Eurocode 2. – Final draft of April 2018 by the Project Team SC2.T1 working on Phase 1 of the CEN/TC 250 work programme under Mandate M/515. – 293 p.
4. fib Model Code for Concrete Structures 2010. – Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), Switzerland, 2013. – 432 p.

5. Byiliding Code Requirements for Structural Concrete and Commentary : ACI 318R-02.

6. Ramos Bernardo, J.T. The mechanics of punching in reinforced concrete slabs and footings without shear reinforcement : Ph.D. thesis : 12.03.2018 / J.T. Ramos Bernardo. – Lausanne Polytechnic School, 2018. – 223 p.

7. 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.

8. Lu, S. A Novel Feature Selection Approach Based on Tree Models for Evaluating the Punching Shear Capacity of Steel Fiber-Reinforced Concrete Flat Slabs / S. Lu, M. Koopialipoor, P. G. Asteris, M. Bahri and D.J. Armaghani // Materials. – 2020.

9. ResearchGate [Electronic resource] : Article Evaluating Punching Shear Strength of Slabs without Shear Reinforcement Using Artificial Neural Networks – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/289061608_Evaluating_punching_shear_strength_of_slabs_without_shear_reinforcement_using_artificial_neural_networks. – Date of access: 10.09.2022.

10. Crystals [Electronic resource] : Article Interpretable Machine Learning Models for Punching Shear Strength Estimation of FRP Reinforced Concrete Slabs. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/cryst12020259>. – Date of access: 10.09.2022.

11. Основы проектирования строительных конструкций = Основы проектирования будаунічных канструкцый : ТКП EN 1990-2011. – Введ. 15.11.2012. – Минск : СЕН/ТС 250 «Конструкционные Еврокоды» : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2011. – 70 с.

12. Университет искусственного интеллекта [Электронный ресурс] : Что такое нейронные сети, что они могут, и как написать нейронную сеть на Python? – Режим доступа: <https://neural-university.ru/neural-networks-basics>. – Дата доступа: 10.09.2022.

References

1. Fernández Ruiz, M. Post-punching behavior of flat slabs / M. Fernández Ruiz, Y. Mirzaei, A. Muttoni // ACI Struct. J. – 2013, Vol. 110. – P. 801–812.

2. Proektirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij. CHast' 1-1. Obshchie pravila i pravila dlya zdaniy = Praektavanne zhalezabetonnyh kanstrukcyj. CHastka 1-1. Agul'nyya pravily i pravily dlya budynkau : ТКР EN 1992-1-1-2009. – Vved. 10.12.2009. – Minsk : CEN/TS 250 «Evrokody konstrukcij» : Ministerstvo arhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus', 2009. – 207 s.

3. Design of concrete structures – Part 1-1: General rules, rules for buildings, bridges and civil engineering structures : prEN 1992-1-1:2018 Eurocode 2. – Final draft of April 2018 by the Pro-ject Team SC2.T1 working on Phase 1 of the CEN/TC 250 work programme under Mandate M/515. – 293 p.

4. *fib* Model Code for Concrete Structures 2010. – Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), Switzerland, 2013. – 432 p.

5. Byiliding Code Requirements for Structural Concrete and Commentary : ACI 318R-02.

6. Ramos Bernardo, J.T. The mechanics of punching in reinforced concrete slabs and footings without shear reinforcement : Ph.D. thesis : 12.03.2018 / J.T. Ramos Bernardo. – Lausanne Poly-technic School, 2018. – 223 p.

7. 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.

8. Lu, S. A Novel Feature Selection Approach Based on Tree Models for Evaluating the Punching Shear Capacity of Steel Fiber-Reinforced Concrete Flat Slabs / S. Lu, M. Koopialipour, P. G. Asteris, M. Bahri and D.J. Armaghani // Materials. – 2020.

9. ResearchGate [Electronic resource] : Article Evaluating Punching Shear Strength of Slabs without Shear Reinforcement Using Artificial Neural Networks – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/289061608_Evaluating_punching_shear_strength_of_slabs_without_shear_reinforcement_using_artificial_neural_networks. – Date of access: 10.09.2022.

10. Crystals [Electronic resource] : Article Interpretable Machine Learning Models for Punching Shear Strength Estimation of FRP Reinforced Concrete Slabs. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/cryst12020259>. – Date of access: 10.09.2022.

11. Osnovy proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij = Osnovy praektavannaya buda-unichyh kanstrukcyj : TKP EN 1990-2011. – Vved. 15.11.2012. – Minsk : CEN/TS 250 «Konstrukcionnye Evrokody» : Ministerstvo arhitektury i stroitel'stva Respubliki Belarus', 2011. – 70 s.

12. Universitet iskusstvennogo intellekta [Elektronnyj resurs] : Chto takoe nejronnyye seti, chto oni mogut, i kak napisat' nejronnyuyu set' na Python? – Rezhim dostupa: <https://neural-university.ru/neural-networks-basics>. – Data dostupa: 10.09.2022.

УДК 624.014

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ И НЕОБХОДИМЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ В ОБЛАСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В. В. Надольский¹

¹ К. т. н., доцент, доцент кафедры технологии строительного производства
УО «Брестский государственный технический университет»,
Брест, Беларусь, e-mail : Nadolski@mail.by

Реферат

Постоянные теоретические и экспериментальные исследования стимулируют развитие методов проектирования, что, в свою очередь, вызывает необходимость обновлять нормы проектирования с учётом потребностей и текущей ситуации реального сектора. В отечественной и мировой практике проектирования стальных конструкций можно выделить ряд актуальных направлений совершенствования нормативных документов, которые являются востребованными на сегодняшний день. В данной статье представлен анализ и обоснование перспективных направлений совершенствования нормативных документов в области стальных конструкций. Решение перечисленных приоритетных направлений и регламентация технических указаний в нормативных документах позволит улучшить качество проектных работ, снизить субъективизм принятия проектных решений,