

УДК 624.012.4:691.328

ББК 38.53

М-69

*Михуб Ахмад*, аспирант Ростовского государственного строительного университета;  
*Польской Петр Петрович*, кандидат технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций Ростовского государственного строительного университета;

*Маилян Дмитрий Рафаэлович*, доктор технических наук, профессор кафедры железобетонных и каменных конструкций Ростовского государственного строительного университета;

*Блягоз Алик Моссович*, кандидат технических наук, доцент кафедры строительных и общепрофессиональных дисциплин Майкопского государственного технологического университета, т.: 89184205021, e-mail: alfa-maikop@yandex.ru.

**СОПОСТАВЛЕНИЕ ОПЫТНОЙ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ  
ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК, УСИЛЕННЫХ КОМПОЗИТНЫМИ  
МАТЕРИАЛАМИ, С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЁТА**  
(рецензирована)

*В статье рассматриваются вопросы, связанные с оценкой российского и 3-х зарубежных методов расчёта прочности изгибаемых железобетонных балок, усиленных композитными материалами. Сопоставление выполнено с использованием программного комплекса ANSYS, реализующего метод конечных элементов, и трёх авторских программ разработанных на базе EXCEL. Установлено, что анализируемые методики расчёта изгибаемых элементов, усиленных с использованием угля и стеклопластиков не обладают на настоящий момент достаточной надёжностью из-за значительного разброса опытной и теоретической прочности нормальных сечений.*

*Ключевые слова: бетон, арматура, железобетон, композитные материалы, углепластик, стеклопластик, усиление, методы расчёта, прочность, несущая способность, строительные нормы и правила, блок-схема программы.*

*Mihub Ahmad*, post graduate student of FSBEI HPE “Rostov State University of Civil Engineering”;

*Polskoy Peter Petrovich*, Candidate of Technical Sciences, professor of the department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, FSBEI HPE “Rostov State University of Civil Engineering”;

*Mailyan Dmitry Rafaelovich*, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures of Rostov State University of Civil Engineering;

*Blyagoz Alec Mossovich*, Candidate of Technical Sciences, assistant professor of the department of Construction and General Professional Disciplines of Maikop State Technological University, tel.: 89184205021, e-mail: alfa-maikop@yandex.ru.

**COMPARISON OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STRENGTH OF REINFORCED  
CONCRETE BEAMS STRENGTHENED WITH COMPOSITE MATERIALS USING  
DIFFERENT CALCULATION METHODS**

(Reviewed)

*The questions related to the assessment of Russian and three foreign methods of calculation of flexural strength of concrete beams reinforced with composite materials have been considered in the article. The comparative analysis has been performed using software package ANSYS, implementing the finite element method, and the three original programs developed by the author on the basis of EXCEL. It has been grounded that the analyzed methods of calculating flexural elements, reinforced with carbon and glass fiber does not have at present sufficient reliability due to the considerable scatter of experimental and theoretical strength of the normal sections.*

*Keywords: concrete, rebar, ferro-concrete, composites, carbon fiber, fiberglass, reinforcement, methods of calculation, strength, bearing capacity, building codes, a block diagram of the program.*

Проведенные как в нашей стране, так и за рубежом эксперименты по исследованию прочности железобетонных балок усиленных с помощью различных видов композитных материалов,

показали различный характер разрушения опытных образцов. Как следствие, имеет место разный уровень приращения несущей способности. Для учёта этих факторов при расчёте усиленных железобетонных конструкций, исследователями предложены несколько методик. Большинство из них разработаны за рубежом и положены в основу действующих международных норм по проектированию.

В настоящей статье оценивается надежность 4-х наиболее известных на данный момент методик расчёта, разработанных в России [1], США [2], Италии (метод “ферменной аналогии”) [3], и метод конечных элементов на основе программного комплекса ANSYS [4]. Методики расчёта России и США опубликованы в открытой печати. Они основаны на традиционной теории изгиба железобетонных элементов и, фактически, выполняют роль нормативных документов. Концепция аналоговой модели фермы приведена в работе [5].

Практически не известна в России методика расчёта с использованием метода конечных элементов. С учетом предложений [5], нелинейный анализ железобетонных балок, усиленных композитными материалами, в программном комплексе ANSYS(М.К.Э.) выглядит следующим образом.

В КЭ-модели бетонное тело конструкций балок было разбито на объемные конечные элементы SOLID65 (рис. 1а). Арматуру балок моделировали стержневыми конечными элементами LINK8 (рис. 1б), композит – слоистыми объемными конечными элементами SOLID46 (рис. 1в). Элемент SOLID65 имеет возможность образовывать трещины при растяжении и разрушаться от сжатия. Элемент LINK8 способен воспринимать растяжение и сжатие, имеет свойства пластичности. В КЭ-моделях связь между конструктивами была принята идеальной. Узлы элементов арматуры LINK8 и композита SOLID46 объединялись с узлами элементов SOLID65(рис. 2).

Передачу усилий на КЭ-модели балок моделировали объемными конечными элементами SOLID45, имитирующими металлические пластины. Аналогичное решение было принято и для моделирования мест опирания балок на опорные части.

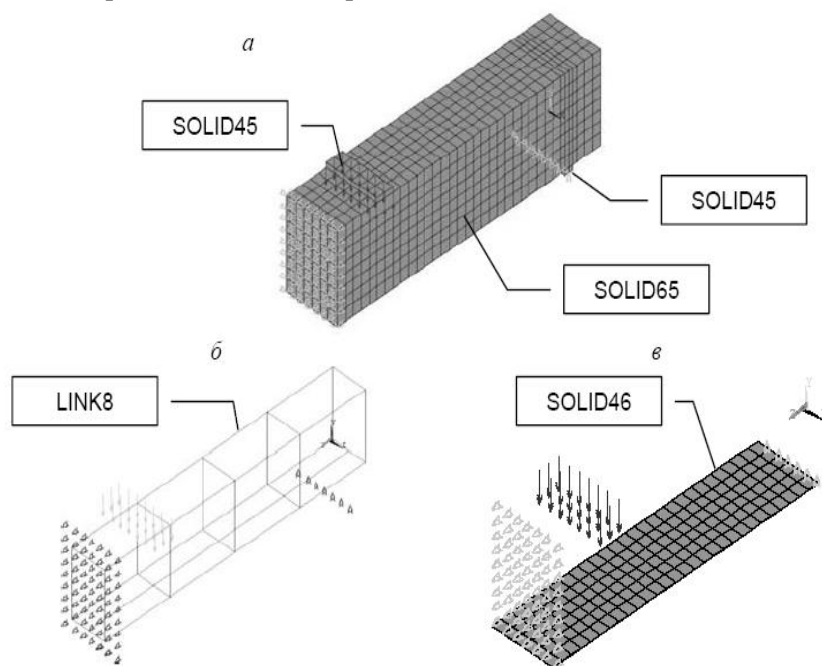


Рис. 1. Конечно-элементная модель железобетонной балки, усиленной композитным материалом:  
а - элементы тела бетона - SOLID65 и металлических пластин - SOLID45;  
б - элементы арматуры - LINK8; в - элементы композита - SOLID46

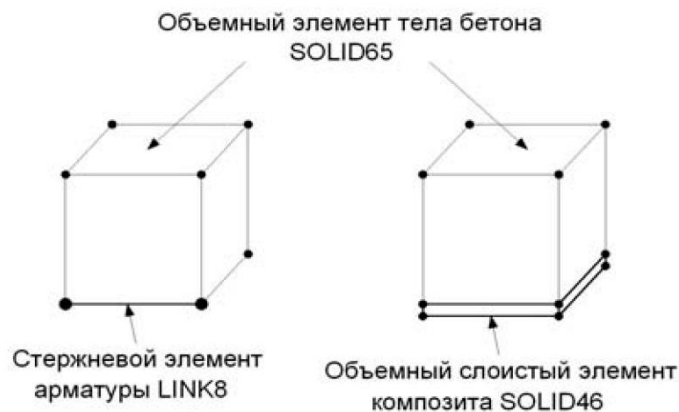


Рис. 2. Способы объединения узлов элементов

При нелинейном анализе в программе ANSYS нагружение моделей осуществляется с определенным шагом, при этом величина шага зависит от поведения модели. Во время упругой работы модели шаг нагружения должен быть максимальным, а в момент трещинообразования или неупругой работы – минимальным.

Программные комплексы для 3-х других методик расчёта отсутствуют. Поэтому, для снижения трудоемкости расчёта при определении теоретической несущей способности балок, усиленных с использованием различных видов композитных материалов, авторами статьи на базе EXCEL разработаны программы расчёта.

Расчётные схемы для поперечных сечении по каждой методике и блок-схемы ход расчета предоставлена на рис. 3-8.

Предлагаемые компьютерные программы предусматривают введение исходных параметров, которые характеризуют размеры сечения усиливаемых образцов; физико-механические свойства бетона и арматуры, включая композитную, а также характер приложения нагрузок. Расчётная схема испытания опытных балок, заложенная в программах дана рис. 9.

Для апробации разработанных программ и оценки рассматриваемых методик расчёта, в обработку были включены 31 опытных образцов 12 авторов из 6 государств, включая Россию.

Первоначальная обработка опытных данных была выполнена без учёта вида композитного материала, используемого при усилении.

Среднее значение отношения опытной прочности усиленных балок  $V_{exp}$  к теоритической  $V_{teor}$  составило 1,041 при расчёте по методике России, 1,27 – по нормам США, 1,005 – по методу аналоговой фермы и 1,069 – при использовании метода конечных элементов. При этом значение

коэффициентов вариации  $V$  для отношения  $V_{exp}/V_{teor}$  по разным методам расчёта составило 0,451; 0,34; 0,189 и 0,102 – соответственно.

Для получения более достоверных данных о влиянии характера разрушения усиленных опытных балок на их теоретическую прочность, был выполнен дополнительный анализ взятых в обработку результатов испытаний в зависимости от вида композитного материала. В обработке участвовало 17 опытных балок усиленных с использованием углепластика и 14 – стеклопластика. Результаты сопоставления опытной и теоретической прочности балок по различным методам расчёта представлены в табл. 4 и 5 и на гистограммах – рис. 10, 11. На этих же рисунках приведены основные параметры опытных образцов.

Анализ полученных результатов расчёта показал следующее. Среднее значение отношения  $V_{exp}/V_{teor}$  при раздельном (по виду композитного материала усиления) и совместном анализе, в наи-большей степени близок к единице при расчёте усиленных элементов по методике России. Близкие результаты получаем и при использовании метода конечных элементов и метода аналоговой фермы. Максимальные отклонение здесь не превышают 10%. Нормы США показали наибольшее отклонение от единицы, которое составляет 23 и 32%. Однако, если сравнивать разброс отношения  $V_{exp}/V_{teor}$  или коэффициент вариации указанного отношения, то получаем обратную картину.

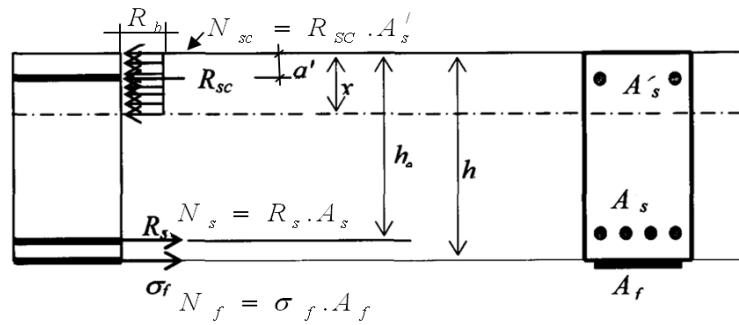


Рис. 3. Расчётная схема для усиленного элемента при расчёте по руководству России

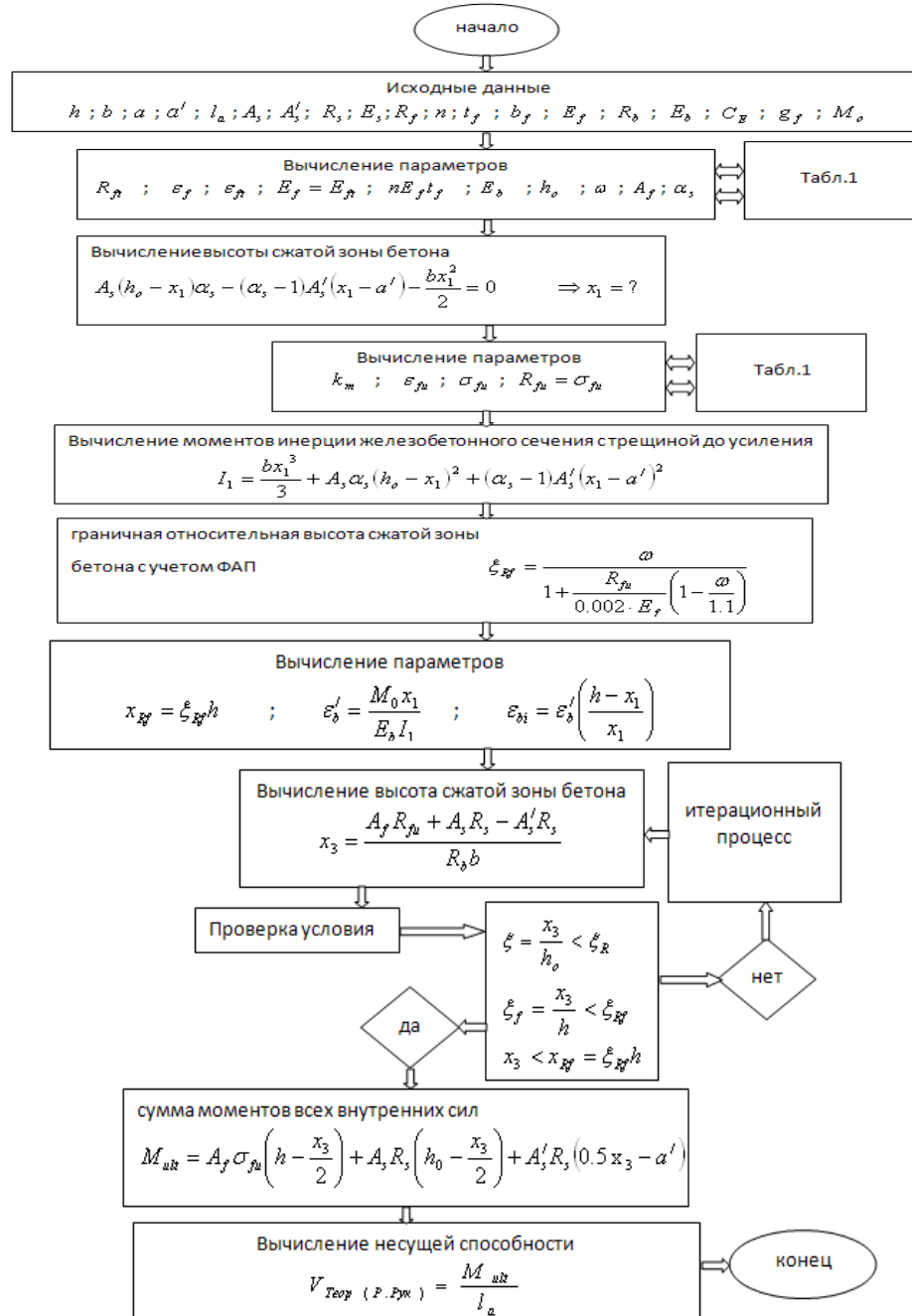


Рис. 4. Блок-схема хода расчёта усиленных элементов по методике России

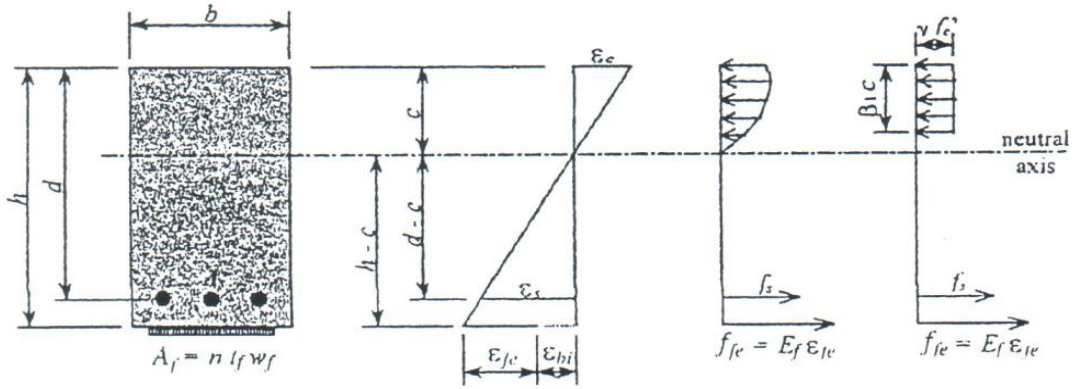


Рис. 5. Расчётная схема для усиленного элемента при расчёте по нормам США

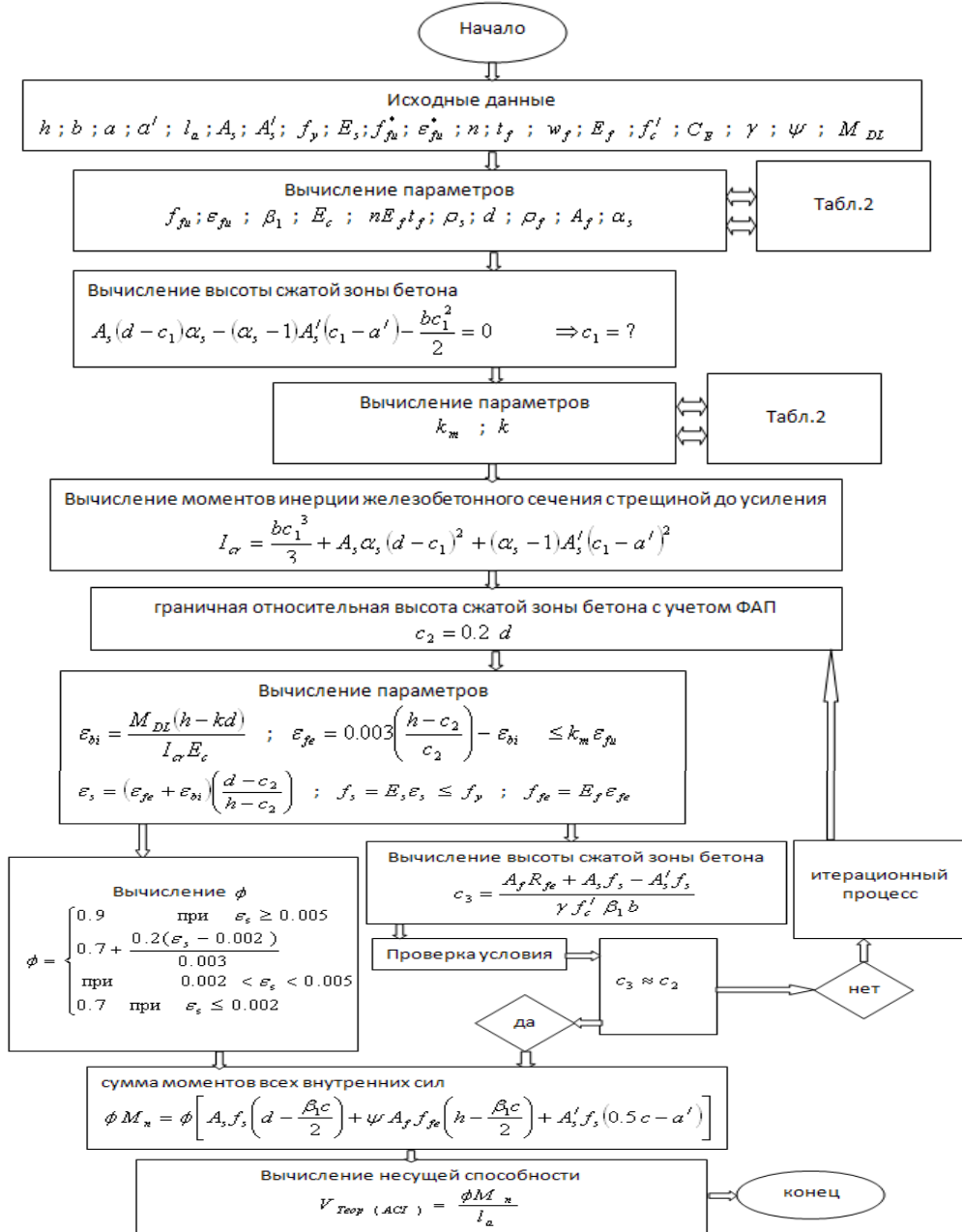


Рис. 6. Блок-схема хода расчёта усиленных элементов по нормам США

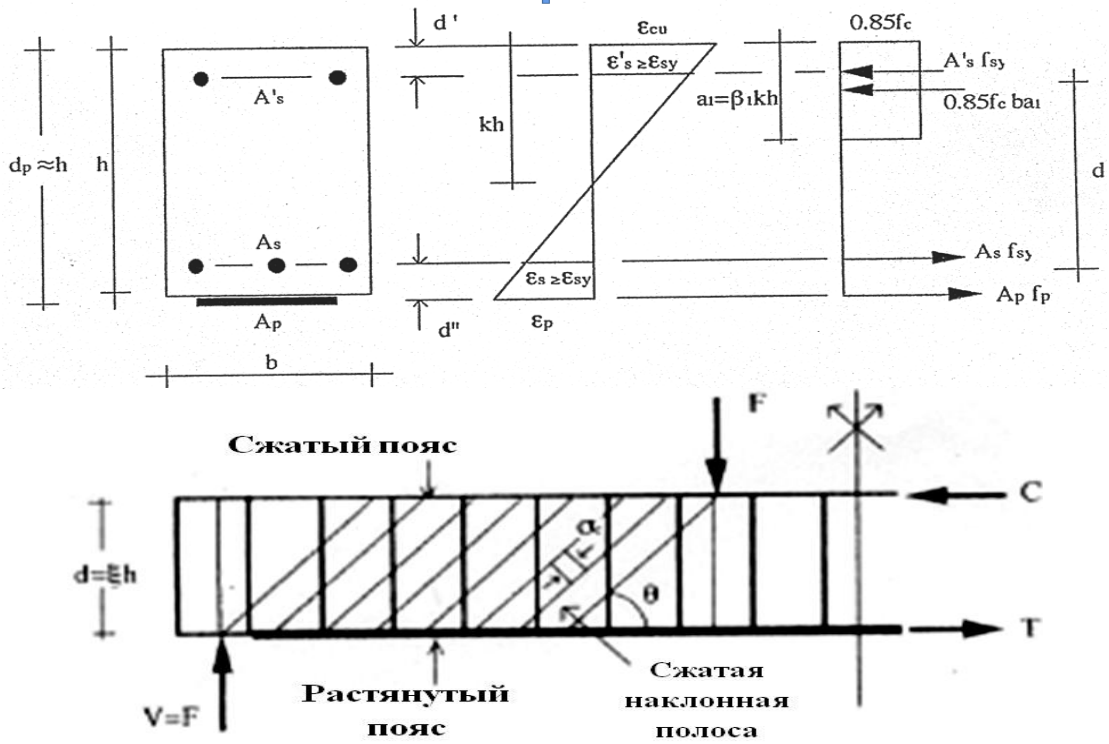


Рис. 7. Расчётная схема для усиленного элемента при расчёте по методу аналоговой фермы

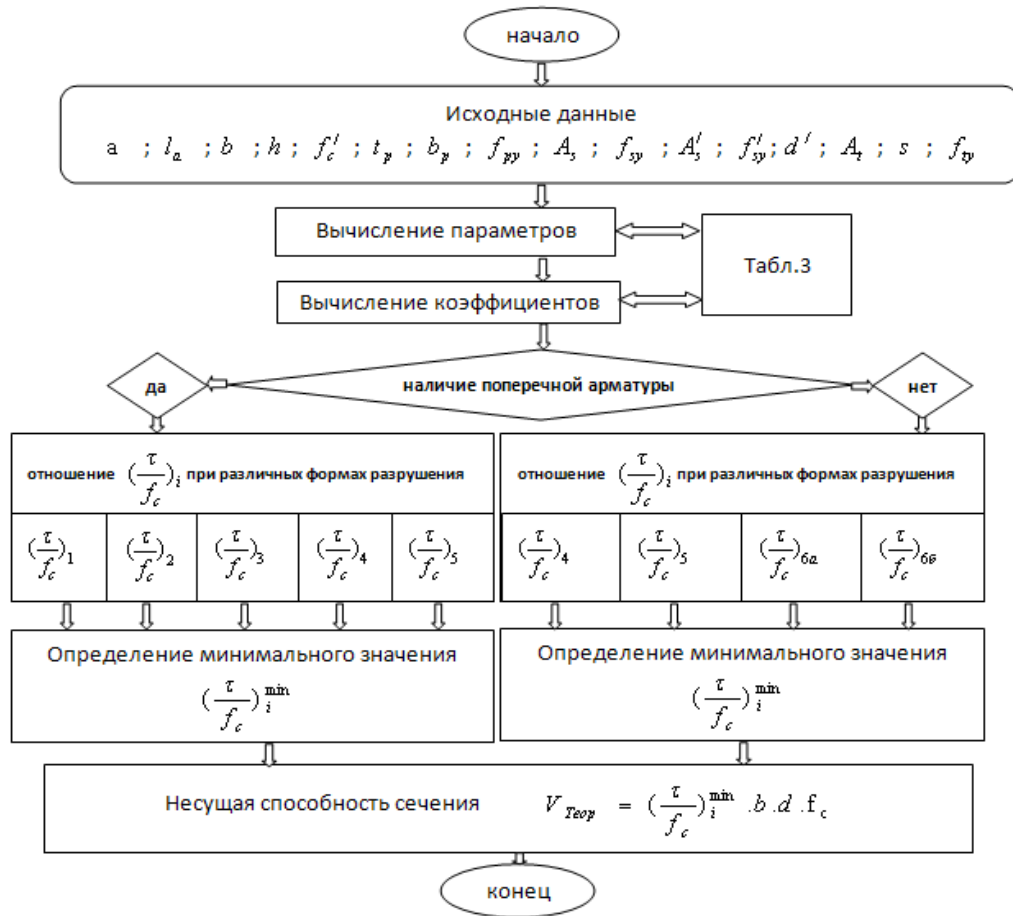


Рис. 8. Блок-схема хода расчёта усиленных элементов по методу аналоговой фермы

Таблица 1 - Расчётные формулы для вычисления параметров по методике России

$$R_{ft} = \frac{C_E}{\gamma_f} R_f$$

$$\varepsilon_{ft} = \frac{R_f}{E_f}$$

$$\varepsilon_{fs} = \frac{C_E}{\gamma_f} \varepsilon_f$$

$$E_f = E_{ft}$$

$$nE_f t_f$$

$$E_b = 57.000 \sqrt{1.15 R_b}$$

$$h_o = h - a$$

$$\omega = \alpha - 0.008 R_b$$

$$A_f = n t_f b_f$$

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_c}$$

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60 \varepsilon_{ft}} \left( 1 - \frac{n E_f t_f}{360000} \right) \leq 0.9 & \text{при } n E_f t_f \leq 180000 \\ \frac{1}{60 \varepsilon_{ft}} \left( \frac{90000}{n E_f t_f} \right) \leq 0.9 & \text{при } n E_f t_f > 180000 \end{cases}$$

$$\varepsilon_{fs} \leq k_m \cdot \varepsilon_{ft}$$

$$\sigma_{fs} = E_{fs} \cdot \varepsilon_{fs}$$

$$R_{fs} = \sigma_{fs}$$

Таблица 2 - Расчётные формулы для вычисления параметров по нормам США

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^*$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$$

$$\beta_1 = 1.09 - 0.08 \frac{f_c'}{10}$$

$$E_c = 57.000 \sqrt{f_c'}$$

$$\rho_s = \frac{A_s}{bd}$$

$$A_f = n t_f w_f$$

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd}$$

$$d = h - a$$

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_c}$$

$$k = \sqrt{\left( \rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \right)^2 + 2 \left( \rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \left( \frac{h}{d} \right) \right)} - \left( \rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \right)$$

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60 \varepsilon_{fu}} \left( 1 - \frac{n E_f t_f}{360000} \right) \leq 0.9 & \text{при } n E_f t_f \leq 180000 \\ \frac{1}{60 \varepsilon_{fu}} \left( \frac{90000}{n E_f t_f} \right) \leq 0.9 & \text{при } n E_f t_f > 180000 \end{cases}$$

Таблица 3 - Расчётные формулы для вычисления параметров и коэффициентов по методу аналоговой фермы

Вычисление параметров	Вычисление коэффициентов
$P_y = A_t \times f_{ty} / s$	$\alpha = a / d$
$U_y = b_p (2.17 + 0.02 (f_c' - 20))$	$\beta = l_a / d$
$T_y = A_s f_{sy} + A_p f_{py}$ где $A_p = b_p \times t_p$	$\Phi = U_y / p_y$
$\beta_1 = 0.85 - 0.008 (f_c' - 30)$	$\eta = \frac{T_y}{b \times d \times f_c}$
$\eta_s' = A_s' f_{sy}' / b d f_c$	$\psi = \frac{P_y}{b \times f_c}$
$\gamma = d' / h$	$a_1 = \frac{T_y}{0.85 \times f_c \times b}$
	$K = \frac{a_1}{\beta_1 \times h}$

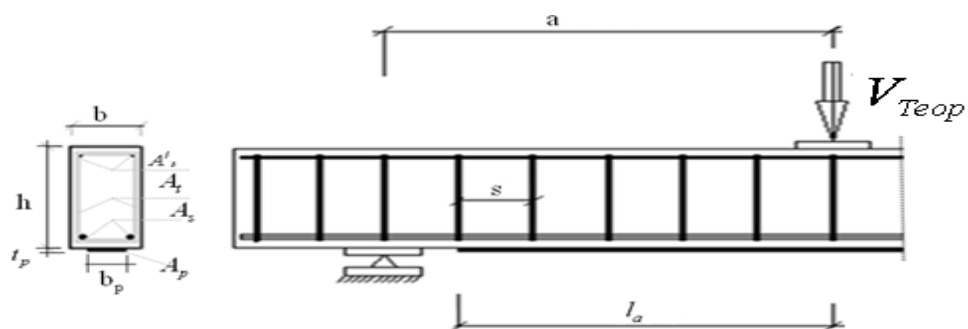
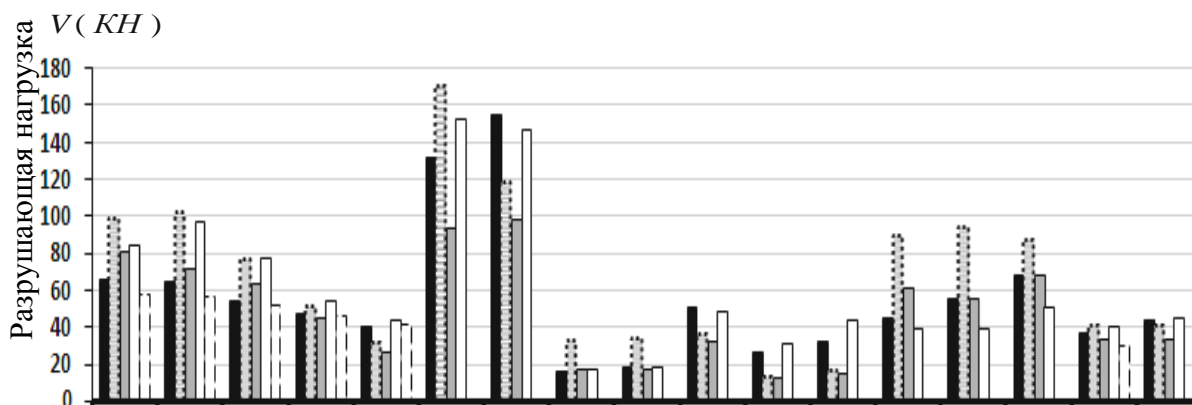


Рис. 9. Расчётная схема испытания балок

Таблица 4 – Сравнение опытной и теоретической прочности балок усиленных с использованием углепластика

Исследователи	Шифр балок	Опытная несущая способность $V_{exp}$ , (кН)	Отношение ( $V_{exp}/V_{teor}$ ) при расчёте по методике			
			Россия	США	Аналог. ферм.	М.К.Э (ANSYS)
Бокарев и др. 2010 (Россия)	Д	66.25	0.67	0.81	0.78	1.15
	БГ	65.17	0.64	0.9	0.68	1.14
	БВ	54.35	0.71	0.85	0.7	1.05
	ББ	47.725	0.94	1.05	0.87	1.05
Рамезаньянпор (Иран)	SI	38.5	1.3	1.53	0.91	0.96
Ардуаини и др. 1997 (США)	SM2	132	0.77	1.41	0.87	-
	MM2	155	1.31	1.58	1.06	-
Фаннинг 1996 (США)	4В	16.2	0.49	0.93	0.92	-
	3А	18.7	0.56	1.04	1.03	-
Хутчинсон 1996 (США)	С.115	51	1.42	1.56	1.04	-
	В.040	27	2.05	2.1	0.86	-
	А.115	32.5	2.01	2.08	0.74	-
Ардуаини и др. 1997 (США)	А5	45	0.51	0.73	1.16	-
	А4	55	0.58	0.98	1.41	-
Девид и др. 1997 (Франция)	Р7	68	0.78	0.99	1.35	-
Спадае и др. 1997 (США)	А3.1	37.4	0.92	1.09	0.93	1.25
	А1.1	43.4	1.07	1.28	0.96	-
Среднее значение отношения $\sum(V_{exp}/V_{teor})/17$			0.984	1.23	0.957	1.1
Средне квадратическое отклонение ( $\delta$ )			0.486	0.419	0.205	0.101
Коэффициент вариации ( $V$ )			0.494	0.426	0.208	0.091





Шифр балок	Д	Б Г	Б В	ББ	SI	S M 2	M M 2	4 В	3 А	С. 11 5	В. 04 0	А. 11 5	А 5	А 4	P7	А 3. 1	А 1. 1
Разм. Сечен. (b*h) (мм)	16 0*	16 0*	16 0*	16 0*	15 0*	32 0*	16 0*	10 0*	10 0*	20 0*	20 0*	20 0*	20 0*	20 0*	15 0*	14 0*	14 0*
$f'_c = 0.85R_b$ Rb, Мпа	47 .8 1	47 .8 1	47 .8 1	47 .8 1	30	36	36	32 .5	37	54	54	54	33	33	40	30	30
$\mu_f$ , %	0. 85	0. 43	0. 28	0. 14	0. 08	0. 59	0. 29	0. 64	0. 64	0. 57	0. 2	0. 57	0. 98	0. 49	0. 27	0. 23	0. 23
$\mu_s$ , %	0. 7	0. 7	0. 7	0. 7	1. 1	0. 5	0. 9	0. 77	0. 77	1. 55	0. 6	0. 6	0. 86	0. 86	0. 73	1. 02	1. 02
Исследователи	Бокарев и др.				Ра ме за нь ян по р	Ардуа ни и др.		Фанни нг		Хутчинсон			Ардуа ни и др.		Де ви д и др.	Спадеа и др.	

Рис. 10. Сопоставление опытной (■) прочности балок усиленных углепластиком и её теоретических значений при расчёте по методикам: ■ - России; ■ - США; □ - аналоговой фермы; □ - конечных элементов

Таблица 5 - Сравнение опытной и теоретической прочности балок усиленных с использованием стеклопластика

Исследователи	Шифр балок	Опытная несущая способность $V_{exp, (кН)}$	Отношение ( $V_{exp}/V_{teor}$ ) при расчёте по методике			
			Россия	США	Аналог. ферм.	М.К.Э (ANSYS)
Рамезаньянпор (Иран)	SI	40	1.3	1.69	1.06	0.9
Алекс и др. 2001 (Франция)	FS2	98.45	0.95	1.46	0.96	-
Фальгвени и др. 1998 (Англия)	A	47.5	0.6	0.8	0.88	-
Хукви 2006 (Канада)	H1	28.5	1.4	1.54	0.84	-
Фаннинг 1996 (США)	4A	14	0.47	0.73	0.79	-
Куантрил и др. 1996 (Франция)	B2	17	1.19	1.36	1.29	-
	A2c	18.7	1.35	1.54	1.15	-
	A2b	18.4	1.33	1.51	1.14	-
	A1c	22	1.5	1.74	1.16	-
Ардуаини и др. 1997 (США)	b2	85	2.12	2.25	0.97	-
Девид и др. 1997 (Франция)	P4	57.5	1.17	1.2	1.07	-
	P2	50.5	1.21	1.36	1.06	-
Хусейн и др. 1995 (США)	FRB7	29	0.48	0.67	1.23	-
	FRB5	30	0.48	0.71	1.27	-
Среднее значение отношения $\sum(V_{exp}/V_{teor})/14$			1.11	1.325	1.062	0.9
Средне квадратическое отклонение ( $\delta$ )			0.472	0.460	0.157	0
Коэффициент вариации ( $V$ )			0.426	0.415	0.141	0

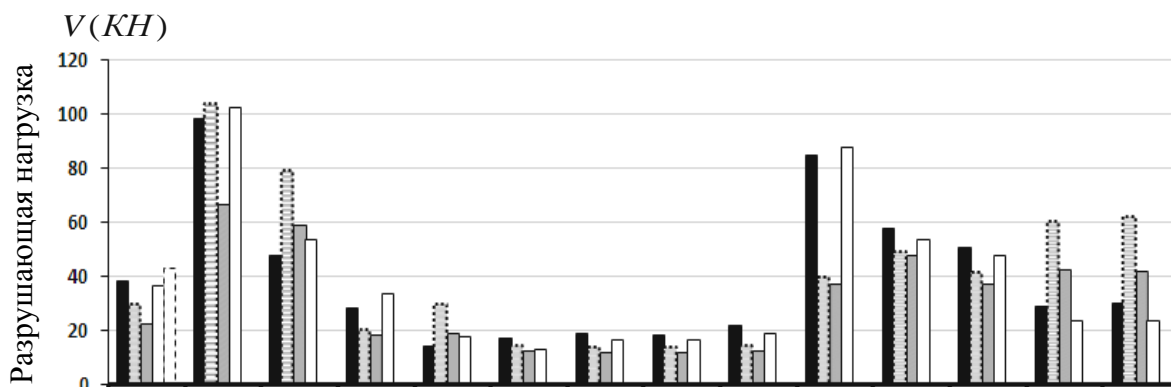


Рис. 11. Сопоставление опытной (■) прочности балок усиленных стеклопластиком и её теоретических значений при расчёте по методикам:  
 ▨ -России; ▤ - США ; □ - аналоговой фермы; - - конечных элементов.

Шифр балок	SII	FS 2	A	H1	4A	B2	A2 c	A2 b	A1 c	b2	P4	P2	FR B7	FR B5
Разм. Сечен. (b*h) (мм)	150*150	150*250	130*200	203*305	100ц*150	100*	100*	100*	100*	300*	150*	150*300	150*	150*
$f'_c = 0.85R_b$ Rb, Мпа	30	45.9	37	41.5	32.5	58	42	42	70	30	40	40	31	31
$\mu_f$ , %	0.08	1.4	0.6	0.17	3.2	0.96	0.96	0.96	0.96	0.04	2	1	1.33	0.88
$\mu_s$ , %	1.1	2.8	0.4	0.46	0.77	1.06	1.06	1.06	1.06	0.35	0.73	0.73	0.8	0.8
Исследователи	Рамезьян по р	Александр др.	Фальгвен и др.	Хуки	Фаннинг	Куантрил				Ардуани и др.	Девид и др.		Хусейн и др.	

Наилучшую сходимость расчёта показал метод конечных элементов. Однако в данном анализе этот метод не показателен в силу малой выборки эксперимента, а именно 6 опытных образцов усиленных с помощью углепластика и один – с использованием стеклоткани. При этом два автора из трех испытывали всего по одному образцу.

Из оставшихся трех методик наилучшую сходимость результатов расчёта и опыта показал метод аналоговой фермы, для которого коэффициент вариации составил 0,141 и 0,208 соответственно при усилении изгибаемых элементов стекло и углепластиком.

Нормы США показали значительно большую величину указанного коэффициента, равного соответственно 0,415 и 0,426. Расчёт балок, усиленных стеклом и углепластиком, с использованием российского руководства... показал еще большее отклонение коэффициента вариации  $V = 0,426$  и  $0,494$  соответственно. Полученный разброс данных касается всех методик и имеет место независимо от соотношения процентов стального и композитного армирования. Из вышеизложенного следует, что анализируемые методы расчёта не дают необходимой надежности, поскольку показатели расчёта значительно превышают нормируемый коэффициент  $V = 0,135$ .

На наш взгляд, уточнение методов расчёта на данном этапе должно сопровождаться не простым накоплением базы экспериментальных данных, фиксирующих различные виды разрушения, а в разработке конструктивных мероприятий, которые должны обеспечить запланированный характер поведения конструкций.

По нашему мнению этого можно достичь при выполнении двух условий. Во-первых, установкой надежных анкерных устройств на торцах элементов усиления. Во-вторых, одновременным

усилением нормальных и наклонных сечений, даже, если последнее по расчёту не требуется. Это связано с резким изменением расчётной схемы изгибаемого элемента, особенно при установке внешней арматуры, имеющей большую несущую способность.

На основе выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Принятые в России, США, и Италии методы расчёта изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами, не дают из-за многообразия форм разрушения необходимой надёжности теоритических расчётов, т.к. коэффициент вариации для отношения  $V_{\text{exp}}/V_{\text{teor}}$  превышают нормативную величину  $V = 0,135$  в 2-3 раза.
2. Расчёт по методу конечных элементов, разработанный на базе программного комплекса ANSYS, показал наиболее надёжные результаты. Однако он нуждается в дальнейшей апробации на более представительной выборке результатов испытаний.
3. Уточнение существующих методов расчёта на современном этапе должно базироваться, на наш взгляд, на разработке надёжных конструктивных мероприятий, которые позволят получить запланированный характер разрушения усиленных конструкций и повысить надёжность методов расчёта.
4. Сходимость результатов расчёта и опыта должно резко улучшиться, если усиление нормальных сечений, наряду с конструктивными требованиями, будет сопровождаться параллельным усилением приопорных участков балок, которое исключит возможность их разрушения по наклонному сечению.

#### **Литература:**

1. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. М.: ИнтерАква: НИИЖБ, 2006.
2. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI 440.2R-02. American Concrete Institute.
3. Vincenzo Colotti, Giuseppe Spadea Shear Strengthening Of RC Beams With Bonded steel or FRP plates // Journal Of Structural Engineering U.S.A. 2001. Vol. 127, №4. P. 367-373.
4. Бокарев С.А., Смердов Д.Н. Нелинейный анализ железобетонных изгибаемых конструкций усиленных композитными материалами // Вестник ТГАСУ. 2010. №2.
5. Михуб Ахмад, Польской П.П., Котеленко Р.В. Расчет железобетонных балок, усиленных композитными материалами, по методу аналоговой фермы // Новые технологии. 2012. Вып. 2.

#### **References:**

1. *Guide for the reinforcement of concrete structures with composite materials. M.: InterAkqua: SRIFC, 2006*
2. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. ACI 440.2R-02. American Concrete Institute.*
3. *Vincenzo Colotti, Giuseppe Spadea. Shear Strengthening Of RC Beams With Bonded steel or FRP plates // Journal of Structural Engineering U.S.A. 2001. Vol.127. No.4. P. 367-373.*
4. *Bokarev S.A., Smerdov D.N. Nonlinear analysis of reinforced concrete structures of flexible composite materials // Journal of TSACU. 2010. № 2.*
5. *Mihub Ahmad, Polskoy P.P., Kotelenko R.V. Calculation of reinforced concrete beams reinforced with composite materials, the method of analogue farms // New technologies. 2012. Iss. 2*