

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФОРМЫ РАЗРУШЕНИЯ И НАХОЖДЕНИЕ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОСОБЫХ РАСЧЁТНЫХ СИТУАЦИЯХ ПОЛНОСТЬЮ ВЕРОЯТНОСТНЫМ МЕТОДОМ

Тур А.В., Лизогуб А.А.

Согласно EN 1992 для конструктивных систем должна выполняться проверка предельного состояния живучести. Требования живучести относятся к проверкам конструктивных систем в особых расчётных ситуациях.

В последние годы вместе с развитием строительной отрасли возрастает и сложность возводимых сооружений. Как было отмечено в работе [1] *“нарастающее расширение знаний ведёт к усиливающейся специализации во всех областях... Опасность ошибок становится большей вследствие того, что определенные точки зрения могут оказаться неучтенными, так как никто не отвечает за это. Следовательно, для безопасности сооружения перво-степенную роль играет деятельность сознающего риск руководителя...”*.

Особая расчётная ситуация может возникнуть, в частности, в связи с халатностью или большими человеческими ошибками при проектировании и строительстве. Это явление тесно связано с “культурой” проектировщиков и строителей в рамках страны, города или отдельной организации. Стоит также иметь в виду, что, как было отмечено в [1], *“... большая же часть сооружений после окончания их строительства предоставлена сама себе, и часто пользователь даже не осведомлён о предельных допустимых нагрузках на сооружение”*. Следует отметить так же, что растёт и перечень угроз, которым может подвергаться конструктивная система.

Особое событие характеризуется низкой годовой вероятностью появления, малой продолжительностью, значительной интенсивностью и большими последствиями (рисунок 1).

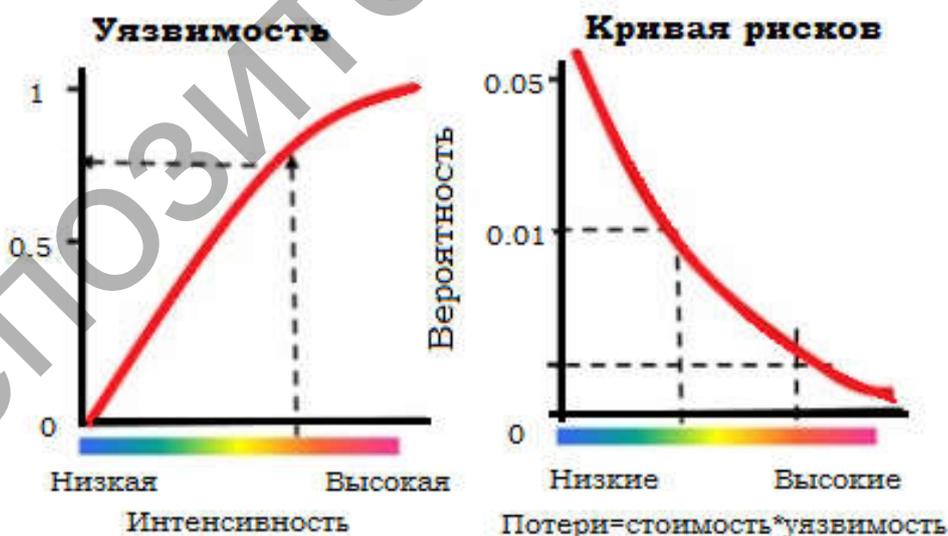


Рисунок 1 – Кривая уязвимостей и кривая рисков

Согласно [3] для предотвращения прогрессирующего обрушения могут быть использованы два расчётных метода: (1) СУ- метод (непрямой метод связевых усилий); (2) АТ – метод (прямой метод альтернативных траекторий).

Прямой АТ-метод наиболее широко используется в практике и основывается на критерии, отвечающим за способность системы, получившей локальное повреждение, противостоять

непропорциональному обрушению. Рекомендуется применять следующие расчётные процедуры: (1) Нелинейный динамический расчёт (NLD); (2) Нелинейный статический расчёт (NLS). Нелинейный динамический расчёт позволяет, с одной стороны, смоделировать реальное поведение конструктивной системы после удаления ключевого элемента, однако, с другой стороны, обладает рядом неопределённостей (скорость приложения нагрузки, коэффициент демпфирования). Поэтому чаще применяют так называемый квазистатический расчёт [2], основанный на нелинейном статическом расчёте.

Как было показано в собственных исследованиях [2], на живучесть конструктивной системы наибольшее влияние оказывает степень пластической деформативности. Таким образом, проверка живучести сводится к прогнозированию формы разрушения и пластических свойств системы. Такое прогнозирование можно осуществлять только с использованием нелинейных расчётов, применяя полностью вероятностный метод. Наиболее важным вопросом при выполнении таких анализов является задание характеристик материалов. Вариативность в задании прочностных характеристик материалов бетона и стали влияет на нелинейную реакцию системы и, как следствие, квазистатическое сопротивление.

Проверка предельного состояния живучести является, по-существу, соответствующей интерпретацией полной нелинейной реакции системы, полученной при нелинейном расчёте, в отличие от традиционного проектирования, в котором используется лишь некоторая её часть (различные параметрические точки (IO, LS, CP) на диаграмме нелинейной реакции, рисунок 2).

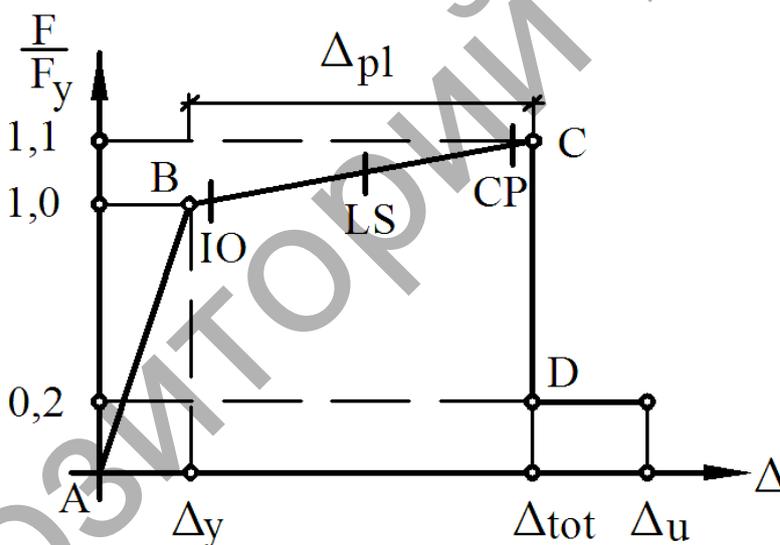


Рисунок 2 – Идеализированная диаграмма “сила-перемещение” для описания нелинейной реакции конструктивной системы согласно FEMA 356

В соответствии с положениями, изложенными в FEMA 356, на диаграмме “сила-перемещение” (рисунок 2) выделено несколько характерных состояний конструктивной системы:

IO (Immediate Occupancy) – состояние, в котором конструктивная система сохраняет несущую способность и является устойчивой. Конструктивные элементы (главные и второстепенные) имеют незначительные повреждения (трещины, прогибы и т.д.). Здание остается безопасным для использования после максимального восстановления и ремонта;

LS (Life Safety) – состояние, в котором конструктивные элементы обладают некоторым остаточным сопротивлением и жесткостью, сохраняют способность воспринимать действующие вертикальные нагрузки, не наблюдается потеря устойчивости вертикальных элементов (колонн и стен). Угроза обрушения отсутствует. Здание может быть подвергнуто восстановлению и ремонту при соответствующем экономическом обосновании;

CP (Collapse Prevention) – состояние, в котором главные горизонтальные элементы конструктивной системы обладают малой остаточной несущей способностью и жесткостью, но вертикальные (колонны и несущие стены) функционируют. Конструктивная система обладает незначительной устойчивостью. Допускаются любые повреждения (чрезмерные прогибы, ширина раскрытия трещин), но не приводящие к общей потере устойчивости здания. Конструктивная система находится на стадии, предшествующей разрушению.

В качестве примера применения полностью вероятностного метода была рассмотрена консольная балка длиной 3000 мм и сечением 200x300 мм с коэффициентом армирования $\rho=1,4\%$ (рисунок 3), в которой место появления пластического шарнира легко прогнозируется. Сосредоточенная сила приложена в узел на конце балки.

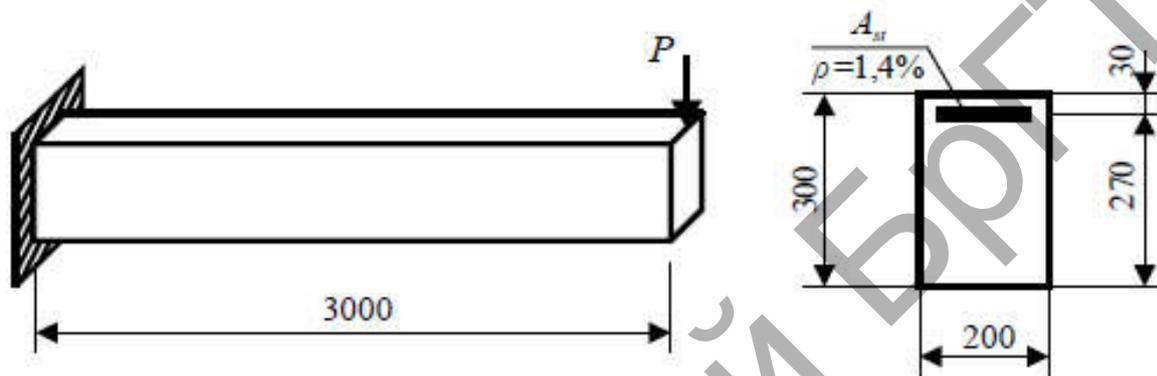


Рисунок 3 – Расчётная схема балки

Параллельно были сгенерированы выборки логнормально распределенных случайных величин прочностных характеристик бетона ($f_{cm}=28$ МПа и $\sigma=4.8$ МПа) и стали ($f_{ym}=500$ МПа и $\sigma=30$ МПа). Было составлено $N=15$ случайных пар прочностей “бетон-сталь”, которые были использованы как входные данные для нелинейных расчётов (таблица 1, рисунок 4) в качестве пиковых точек на диаграммах деформирования.

Бетон

	Strain	Stress	Point ID
1	-3,500E-03	-17,9	
2	-3,000E-03	-23,71	A
3	-2,500E-03	-27,45	
4	-2,000E-03	-28,78	
5	-1,500E-03	-27,29	
6	-1,000E-03	-22,46	
7	-5,000E-04	-13,65	
8	0,	0,	
9	1,500E-04	2,2	

Сталь

	Strain	Stress	Point ID
1	-0,05	-559,67	
2	-2,800E-03	-559,67	A
3	0,	0,	
4	2,800E-03	559,67	
5	0,05	559,67	

Рисунок 4 – Параметрические точки диаграммы деформирования бетона и стали для i-ой симуляции

На рисунке 5 представлен пример задания характеристик пластического шарнира для i-ой симуляции, полученных из зависимости “момент-кривизна” для сечения с заданными характеристиками материалов.

Далее выполнялось $N=15$ нелинейных расчётов консольной балки. Используя положения метода энергетического баланса [2], было найдено $N=15$ значений квазистатического сопротивления $F_{ps,ui}$ (таблица 1). На рисунке 6 представлен пример нахождения квазистатического сопротивления для i-ой симуляции.

Таблица 1 – Случайные пары прочностных характеристик материалов и значений квазистатического сопротивления для консольной балки

№ симуляции	Прочностная характеристика, [МПа]		Предельное перемещение, [мм]	Предельная сила, [кН]
	Бетон	Сталь		
	f_{ci}	f_{yi}	δ_{ui}	$F_{ps,ui}$
1	28.78	559.67	448.98	32.18
2	32.05	547.54	445.14	32.03
3	27.45	598.37	447.63	33.07
4	35.83	582.96	458.84	34.44
5	21.84	588.97	441.01	30.86
6	36.05	569.08	458.08	33.84
7	26.14	562.38	431.90	31.19
8	31.21	578.40	452.83	33.49
9	29.01	585.18	430.99	33.40
10	23.92	536.73	446.72	29.74
11	27.64	519.49	449.86	30.26
12	28.50	516.83	448.81	30.26
13	20.88	594.82	441.93	29.75
14	35.12	544.02	459.61	32.61
15	27.52	517.70	447.77	30.07

Одной из наиболее важных задач при выполнении нелинейных расчётов является обеспечение формата безопасности при проверке предельного состояния несущей способности (ULS). Полученные результаты нелинейного анализа были использованы при определении глобального коэффициента безопасности γ_R .

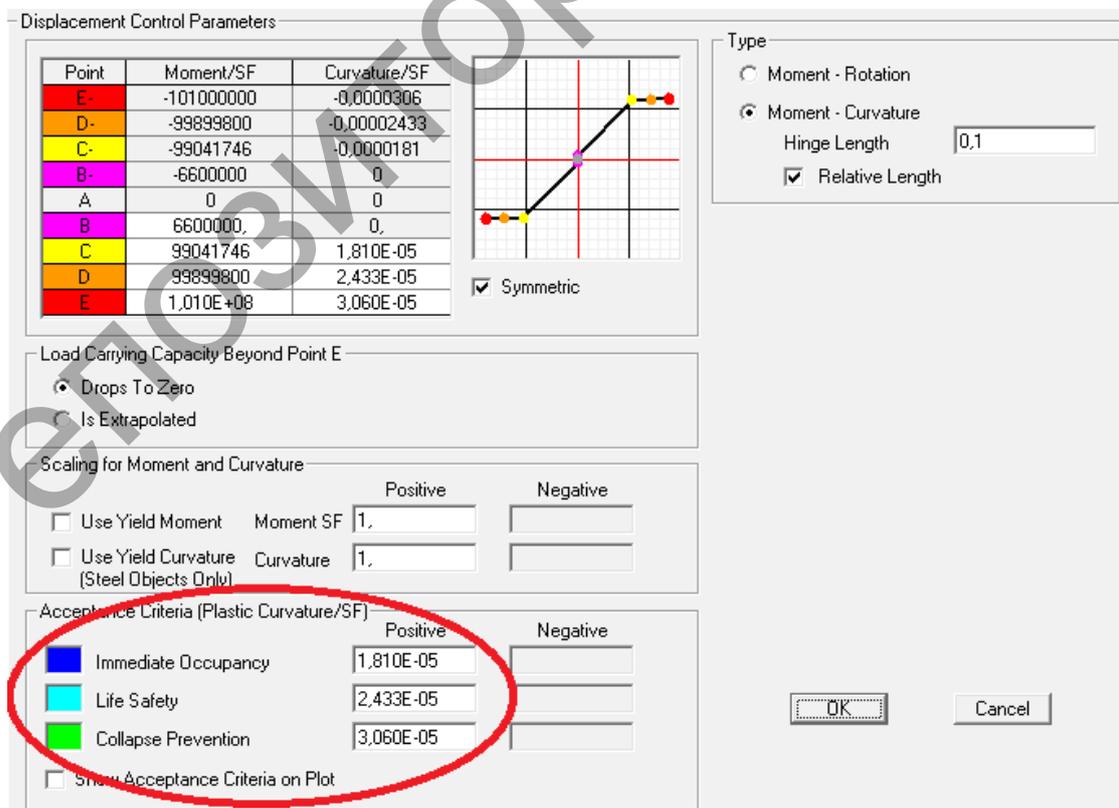


Рисунок 5 – Характеристики пластического шарнира для i -ой симуляции

Применяя метод порядковых статистик, находим характеристическое значение квазистатического сопротивления $F_{ps,u,k}$ (5% - квантиль распределения) для различных уровней обеспеченности и, применяя метод, представленный в [4], находим коэффициенты вариации и значения глобальных коэффициентов безопасности.

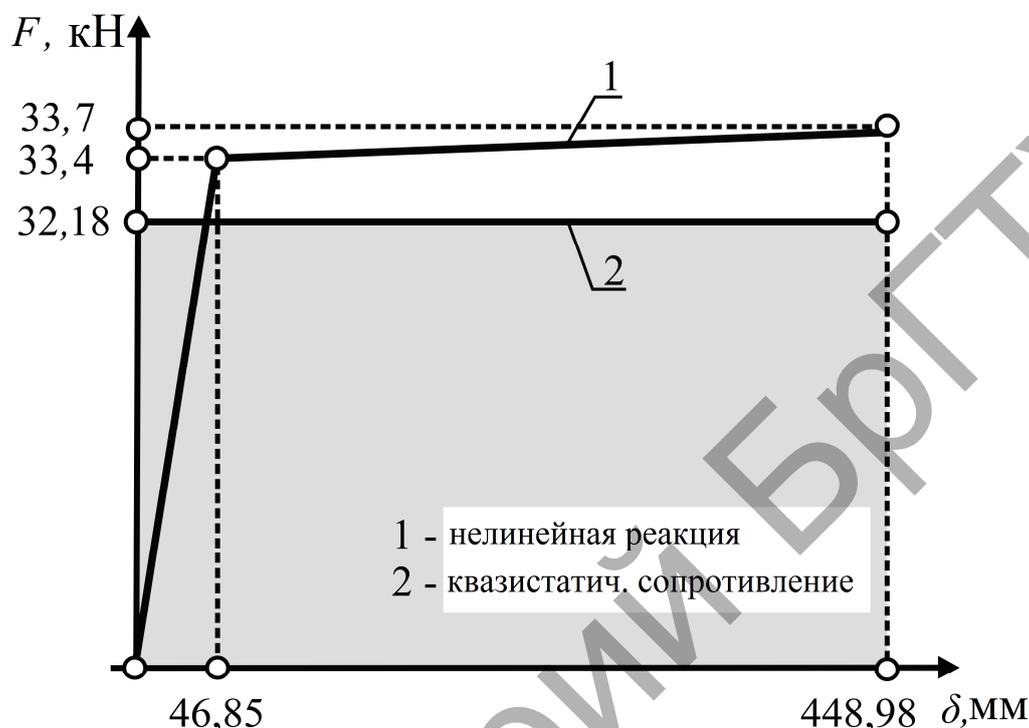


Рисунок 6 – Пример нахождения квазистатического сопротивления для i-ой симуляции

Таблица 2 – Значения характеристических квазистатических сопротивлений и глобальных коэффициентов безопасности для анализируемой балки

		Уровень обеспеченности	λ_1	λ_2	$F_{ps,u,k}$	$F_{ps,u,m}$	V_R	γ_R
$F_{ps,u,lowest}$	29.74	0.5	-0.19	0.12	29.702	31.813	0.042	1.136
Δ_{2-1}	0.004	0.75	0.46	0.72	29.508		0.046	1.150
Δ_{3-2}	0.320	0.9	1.67	1.85	29.141		0.053	1.177

Note: 1. Эстиматор p-ой квантили для соответствующего уровня обеспеченности

$$F_{ps,u,k} = F_{ps,u,lowest} - \lambda_1 \Delta_{2-1} - \lambda_2 \Delta_{3-2}$$

2. Коэффициент вариации $V_R = 1.64 \ln(F_{ps,u,m} / F_{ps,u,k})$

3. Глобальный коэффициент безопасности $\gamma_R = \exp(\alpha_R \beta V_R)$ или $\gamma_R = \exp(3.04 V_R)$

Как видно из таблицы 2 значения глобального коэффициента безопасности находится в пределах: от 1.14 до 1.17 для различных уровней обеспеченности для определения $F_{ps,u,k}$. Таким образом, для практического применения может быть принято в данном случае значение $\gamma_{Rd} = 1.2$.

Закключение

Полностью вероятностный метод при определении нелинейной реакции системы и квазистатического сопротивления наиболее перспективный метод предсказания формы разруше-

ния и проверки предельного состояния живучести. Имея ограниченный набор квазистатических сопротивлений ($3 \leq N \leq 15$) возможно вычислить характеристическое значение сопротивления, опираясь, например, на Теорию Порядковых Статистик. Это оценивание происходит со стороны сопротивления. Следует отметить, что необходимо также произвести оценку со стороны нагрузок (сочетаний нагрузок), а так же назначить уровень надёжности при выполнении таких проверочных расчётов.

Список источников

1. Шпёте Г. Надёжность несущих строительных конструкций/ пер. с нем. О. О. Андреева. – М.: Стройиздат, 1994. – 288 с.
2. Tur A., Tur V. Reliability Approaches to Modeling of the Nonlinear Pseudo-static Response of RC-structural Systems in Accidental Design Situations/ A. Tur, V. Tur // Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering. – 2018. – № 1 (22). – P. 76–87.
3. Ellingwood B. R. (2002) Load and resistance factor criteria for progressive collapse design, In National Workshop on Prevention of Progressive Collapse Rosemont: National Institute of Building Science.
4. Červenka, V. (2013). Global safety formats in fib Model Code 2010 for design of concrete structures, Proceedings of the 11th Probabilistic Workshop, Brno.