

УДК 624.046.5

DOI 10.52928/2070-1683-2024-39-4-40-49

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕРКИ ЖИВУЧЕСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ В ОСОБЫХ РАСЧЕТНЫХ СИТУАЦИЯХ, ОСНОВАННАЯ НА КОНЦЕПЦИИ «PERFORMANCE BASED DESIGN (PBD)». ЧАСТЬ 1

канд. техн. наук, доц. А.В. ТУР
(Брестский государственный технический университет)
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9744-9044>

Подходы к проектированию и/или проверкам конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, включенные в предписывающие нормативно-технические документы, не только не имеют единой методологической основы, но в ряде случаев устанавливают не связанные между собой проверочные критерии и форматы безопасности. Применительно к проверкам конструктивных систем в особых расчетных ситуациях наиболее рациональным можно считать подход к проектированию, основанный на отклике/поведении (англ. *performance based design*) конструктивной системы, или еще другими словами – выходном результате (англ. *outcomes-based design*), общие положения которого для условий проектирования конструктивных систем из железобетона изложены в *fib MC 2020*. Согласно этому документу, *performance-based design* – инженерный подход к проектированию элементов здания на основе согласованных проектных целей и задач, инженерного анализа и количественной оценки соответствия альтернатив поставленным целям и задачам проектирования с использованием принятых инженерных инструментов, методологий и критериев приемки выходного результата. В статье представлены основные положения новой парадигмы проектирования конструктивных систем, основанного на выходном результате.

Ключевые слова: живучесть, особая расчетная ситуация, проектирование, основанное на результате, отклик конструкции, уровень повреждения.

Введение. В настоящее время проверки конструктивных систем в особых расчетных ситуациях выполняют согласно требованиям предписывающих норм, стандартов, указаний^{1,2}. Как показал анализ, подходы к проектированию и/или проверкам конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, включенные в нормативно-технические документы, не только не имеют единой методологической основы, но в ряде случаев устанавливают не связанные между собой проверочные критерии и противоречивые форматы безопасности, что было показано в наших работах, например, [1]. Это особенно ощутимо при выполнении нелинейных (статических и/или динамических) расчетов с использованием конечно-элементных моделей. Согласно действующим нормам^{3,4} в рамках принятых стратегий защиты конструктивных систем от прогрессирующего обрушения, модели сопротивлений и эффектов воздействий имеют, главным образом, полувероятностную основу метода частных коэффициентов, а проверки сводятся к выполнению детерминистических неравенств (вида $Ed \leq Rd$ или $C \leq C_{lim}$), что позволяет обойти прямое сравнение (в явном виде) мер надежности, не выполнять анализ последствий, вычисление рисков и миновать процедуру принятия решений (проектируя по принципу «так записано в нормах»). Это может быть вполне приемлемым для решения традиционных задач проектирования, но не содержит практически никакой полезной информации при проверках конструктивных систем в особых расчетных ситуациях. Таким образом, действующие в настоящее время предписывающие нормы^{5,6,7} определяют некоторые минимальные расчетные/проектные требования, гарантирующие, главным образом, конструктивную безопасность для прогнозируемых проектных событий (воздействий) с известной изменчивостью в соответствующей расчетной ситуации.

Вероятностные нормы проектирования первого поколения⁸ позволяют выполнять оценку поведения конструктивной системы, опираясь на вычисленную вероятность отказа p_f или связанный с ней индекс надежности β , опять же сводя проверки к уровню детерминистических неравенств вида ($p_f \leq p_{tag}$ или $\beta \geq \beta_{tag}$). При данном подходе последствия отказа определяют, а скорее устраняют, принимая более высокий уровень надежности при проверках предельных состояний, которые считают «критическими» с точки зрения того, что они приводят к более серьезным ожидаемым последствиям (дифференциация по классам последствий согласно СН 2.01.01⁹).

¹ СН 2.01.01-2022. Основы проектирования строительных конструкций. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 70 с.

² СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 145 с.

³ См. сноску 2.

⁴ СТБ ISO 2394-2007. Надежность строительных конструкций. Общие принципы. – Минск: Госстандарт Респ. Беларусь, 2007. – 69 с.

⁵ См. сноску 1.

⁶ См. сноску 2.

⁷ См. сноску 4.

⁸ JCSS Probabilistic Model Code. Part I. Basis of Design. JCSS-OSTI /DIA/VROU-10-11-2000. URL: https://www.jcss-lc.org/publications/jcsspmc/part_i.pdf.

⁹ См. сноску 1.

Однако несмотря на то, что строительные сооружения, запроектированные в соответствии с требованиями предписывающих норм, позиционируют как обладающие адекватными, а скорее неизвестными, уровнями надежности при действующих нагрузках, появление других воздействий, связанных с опасными природными и/или антропогенными событиями, может вызвать различные состояния поврежденных или потери функциональности, часто при значениях воздействий меньших, чем расчетные по проекту, что в свою очередь приводит к существенным экономическим потерям. Эти потери могут оказывать серьезное влияние на собственников, жильцов и часто имеют значительный отрицательный резонанс в обществе, его социальных и экономических институтах. Так, согласно FEMA 445¹⁰, многие критические объекты инфраструктуры, включая здания больниц, школ, пожарных депо и т.д., были выведены из эксплуатации после стихийных бедствий, даже в тех случаях, когда повреждения были относительно небольшими, что допускало их дальнейшее функционирование по назначению.

В последнее десятилетие среди специалистов возрастает понимание того, что вероятность отказа, на основе которой калибруют меры надежности в виде системы частных коэффициентов, является только одной из трех составляющих риска. Последствия отказа являются в равной степени важными составляющими риска. Как было отмечено ранее, в нормах вероятностного проектирования первого поколения¹¹ более серьезные последствия отражены лишь косвенно (через более высокие значения индексов надежности для критических предельных состояний, используемых при калибровке системы частных коэффициентов, но без необходимости выполнения анализа последствий и принятия решений).

Наконец, на функциональном уровне, предписывающие критерии (независимо от того, основаны ли они на мерах конструктивной надежности или нет) лишь создают иллюзию того, что соблюдение минимальных требований норм приводит к созданию пригодного и безопасного здания. Однако это не так. Примеры обрушений зданий и сооружений, приведенные в работах (например, в [2]), побудили к поиску методов проектирования, которые позволят ограничить до приемлемых пределов социальные, экологические и экономические последствия, что выходит за рамки традиционного проектирования. Применительно к проверкам конструктивных систем в особых расчетных ситуациях наиболее рациональным можно считать подход к проектированию, основанный на отклике/поведении (англ. *performance based design*) конструктивной системы, или еще другими словами – выходном результате (англ. *outcomes-based design*), общие положения которого для условий проектирования конструктивных систем из железобетона изложены в *fib Model Code 2020*¹². Согласно *fib Model Code 2020*, *performance-based design* – инженерный подход к проектированию элементов здания на основе согласованных проектных целей и задач, инженерного анализа и количественной оценки соответствия альтернатив поставленным целям и задачам проектирования с использованием принятых инженерных инструментов, методологий и критериев приемки выходного результата.

Следует отметить, что в англоязычной технической литературе и стандартах можно найти целый ряд переводов английского слова «performance» (в силу того, что английский язык является языком диалектов, когда одному слову по написанию может соответствовать целый ряд переводов и смыслов). В общем случае, согласно ISO 6241¹³, данный термин наиболее лаконично определен в русской транскрипции как «поведение конструкции, здания, связанное с ее использованием (англ. *Performance-Behavior (of product) related to use*)».

В рамках данного исследования в качестве аналога принят термин «отклик» как наиболее полно, на наш взгляд, выражающий суть анализируемого явления. Применительно к особым расчетным ситуациям термин «отклик», в той мере как его связывают с особыми воздействиями, являющимися результатом реализации опасностей/угроз природного и антропогенного происхождения, обычно относят к состоянию здания после реализации угрозы, т.е. означает, по существу, уровень ожидаемого ущерба и/или величину эффектов воздействий, которым конструктивная система способна противостоять при данных идентифицированных повреждениях. Приемлемый отклик указывает на допустимые уровни повреждений и соответственно последствий (потерь) или состояния, которые в ряде случаев позволяют обеспечить непрерывную и бесперебойную работу объекта.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования в рамках данной статьи является поврежденная конструктивная система, а предметом – ее поведение (отклик) после реализации особого события с учетом полученных повреждений и последствий. Процесс проектирования конструктивной системы, основанный на отклике или требуемом выходном результате, явно оценивает ее поведение (как набор состояний) при различных условиях нагружения, связанных с потенциально опасными событиями. Этот процесс учитывает неопределенности, присущие количественной оценке частоты появления опасных событий и связанных с ними особых воздействий, оценке фактических реакций (отклика) конструктивной системы и потенциального влияния ее состояния на функциональность в зависимости от конечных проектных целей (от состояния непрерывного и бесперебойного функционирования (O) до состояния предотвращения обрушения (CP) и обрушения (C)). Идентификация поведения конструктивной системы, связанного с ее использованием, является неотъемлемой (интегральной) частью общей методологии проектирования и определяет потенциальные варианты конструктивных решений. Очевидно, что при проверках живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях, когда они могут подвергаться одновременно нескольким угрозам (мультипликативной угрозе), необходимо выполнять ранжирование потенциальных опасностей не только с точки зрения частоты их появления, но и принимая во внимание последствия их реализации. Объективной мерой угрозы является величина риска, связанного с отказом. При этом в зависимости от величины

¹⁰ FEMA 445. Next Generation Performance-Based Seismic Design Guidelines. – Washington, 2006. – 155 p.

¹¹ См. сноску 8.

¹² *fib Model Code for Concrete Structures 2020* // International Federation for Structural Concrete. – Lausanne, 2023. – 780 p.

¹³ ISO 6241. Performance Standards in Buildings – Principles for their preparation and factors to be considered // International Standard Organization for Standardization. – Switzerland, 1984. – 9 p.

приемлемого риска определенные опасности/угрозы следует учитывать для моделирования состояний, обеспечивающих непрерывную и бесперебойную работу конструктивной системы здания, тогда как другие – для обеспечения безопасности жизнедеятельности. Следует отметить, что в настоящее время нормативные документы^{14,15,16,17} содержат указания по проектированию на основе новой парадигмы только для сейсмостойкого строительства, за исключением, возможно, только кодекса-образца *fib* MC 2020¹⁸, который распространяет данный подход на проектирование зданий и сооружений из железобетона. Вместе с тем, на наш взгляд, такой подход не следует повсеместно предлагать в качестве простой замены проектирования по традиционным предписывающим нормам, как это сделано, например, в [3], а имеет смысл применения, главным образом, при проверках конструктивных систем ответственных зданий в особых расчетных ситуациях.

При разработке основных положений общей методологии проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях (см. схему, показанную на рисунке 1), в ее основу, с учетом рекомендаций *fib* MC 2020¹⁹, были положены следующие базовые принципы, обеспечивающие адекватное поведение конструктивной системы на протяжении всего жизненного цикла:

- проектирование следует выполнять с учетом основных требований и положений стратегии устойчивого развития согласно *fib* MC 2020²⁰ (рисунок 2);
- проектирование следует выполнять, формулируя требования к отклику (выходному результату) конструктивной системы, который обычно относят к состоянию (уровню повреждения) здания после реализации угрозы;
- следует формулировать требования к управлению жизненным циклом конструктивной системы;
- следует выполнять управление качеством и информацией на всех этапах жизненного цикла;
- следует формулировать требования к возведению и консервации здания в соответствии с разработанными техническими спецификациями;
- следует устанавливать требования к демонтажу и применять принцип цикличности использования материалов демонтированных зданий.

В рамках настоящей статьи основное внимание уделено реализации двух первых групп принципов, которые в общем случае следует рассматривать на стадии проектирования, в частности при проверках живучести в особых расчетных ситуациях.

Методология выполнения проверок живучести конструктивных систем в особых расчетных ситуациях рассматривается как интегральная/составная часть общей методологии проектирования конструктивных систем, основанной на отклике (поведении, связанном с ее использованием) с учетом стратегии устойчивого развития (см. рисунок 2).

Проектирование, основанное на отклике (выходном результате) как новая парадигма проверки конструктивных систем в особой расчетной ситуации.

Краткая историческая справка и базовая концепция новой парадигмы проектирования. До настоящего времени процесс проектирования и строительства остается относительно традиционным, основанным исключительно на т.н. передовом опыте, реализованном в нормах, правилах и стандартах, предписанных законом, которые в силу того, что они пересматриваются через достаточно большие временные интервалы, все-таки подавляют инновации. Строительные нормы и правила существуют по очень простой причине: они созданы для того, чтобы обеспечить в проектируемом здании «безопасную для жизни» среду.

Проектирование, основанное на отклике/выходном результате, как формальный процесс возникло в 1990-х годах в ответ на проблему сейсмостойкого строительства, когда требования к прочностным и деформационным характеристикам материалов, приведенные в нормах и применяющиеся при проектировании новых зданий, не могли быть практически или надежно применены для оценки и модернизации существующих зданий. Подготовка первоначального набора процедур для проектирования сейсмостойких конструкций на основе эксплуатационных характеристик началась в 1992 году в рамках программы FEMA²¹ по снижению сейсмической опасности существующих зданий. В этих документах была изложена первоначальная концепция оценивания уровня ущерба при различных уровнях опасности. Процедуры первого поколения ввели понятие выходного результата в терминах дискретно определяемых ожидаемых уровней повреждения/ущерба: обрушение (C), предотвращение обрушения (CP), безопасность для жизни (LS), немедленное заселение (IO) и эксплуатация (O) (рисунок 3). Они также ввели понятие выходного результата, связанного с повреждением как конструктивных, так и неконструктивных элементов. Проектные цели (или целевые показатели отклика) были разработаны путем привязки одного из этих уровней повреждений к определенному уровню сейсмической опасности/особого воздействия. Расчетные процедуры первого поколения также включали в себя набор аналитических процедур различной сложности, которые можно было использовать для моделирования сейсмической реакции здания, а также предоставляли исчерпывающий набор рекомендаций по методам нелинейного анализа и критериям приемки. Эти процедуры

¹⁴ См. сноску 10.

¹⁵ FEMA 273. Report, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. – Washington, 1997. – 435 p.

¹⁶ FEMA P-58-6. Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Buildings. – Washington, 2018. – 92 p.

¹⁷ FEMA 356. Prestandard and Commentary for the for the Seismic Rehabilitation of Buildings. – Washington, 2020. – 519 p.

¹⁸ См. сноску 12.

¹⁹ См сноску 12.

²⁰ См. сноску 12.

²¹ См. сноску 15.

в методах первого поколения представляли собой важное усовершенствование по сравнению с действующими на тот момент строительными нормами и правилами, поскольку они обеспечивали системный подход к проектированию зданий для достижения желаемого уровня выходного результата.

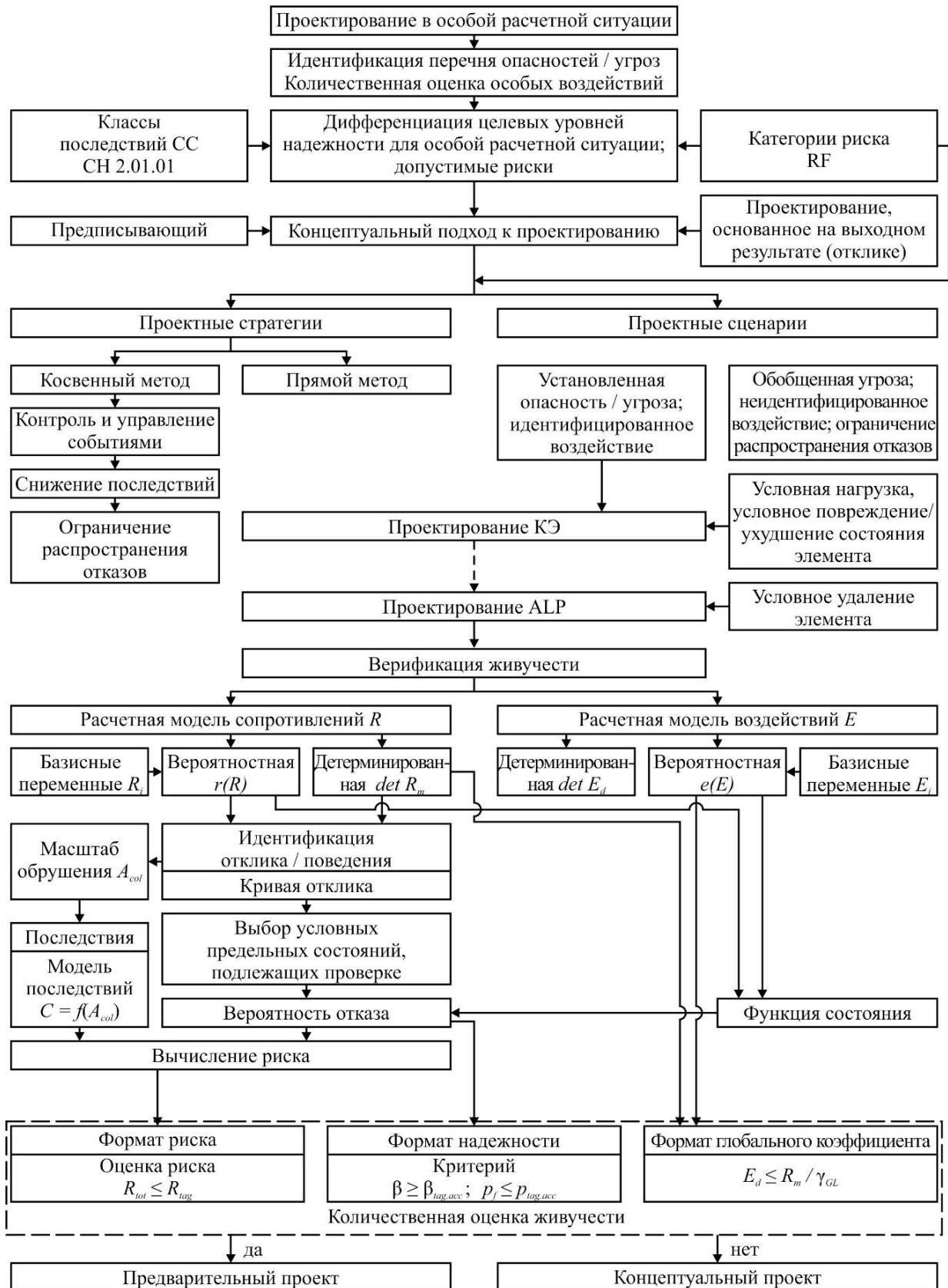
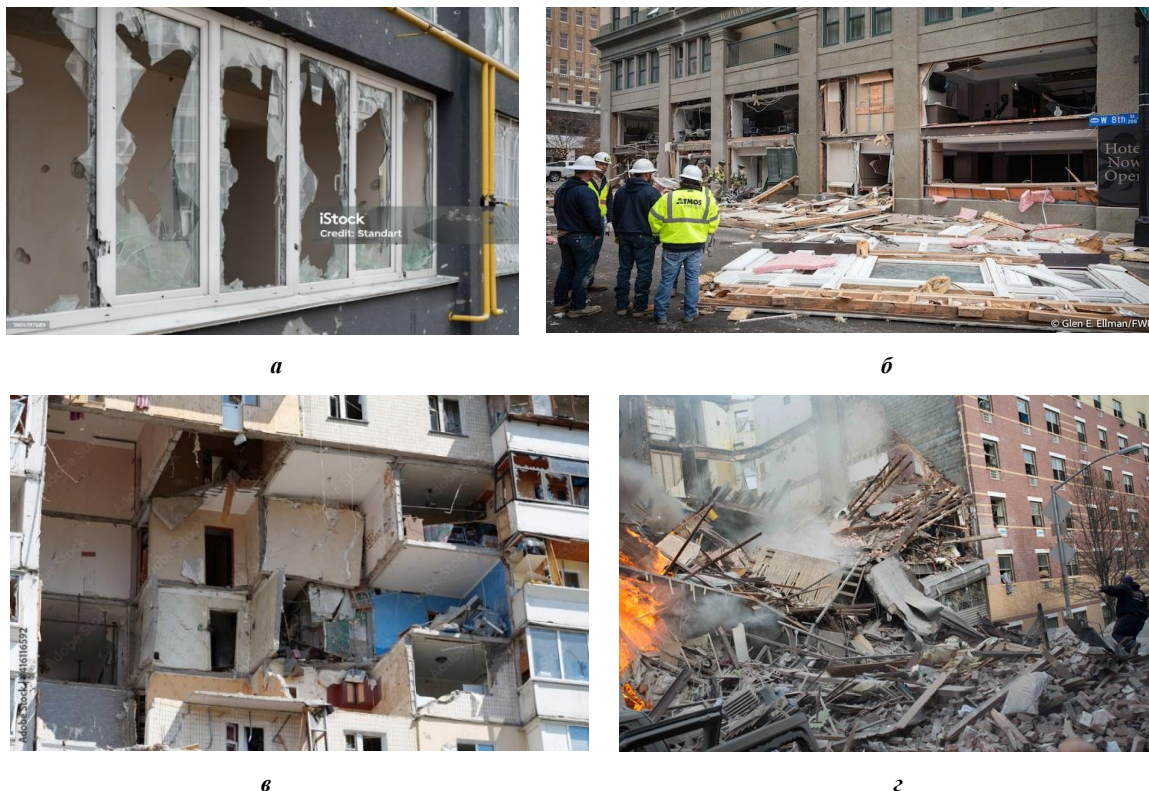


Рисунок 1. – Обобщенная методология проверки живучести конструктивной системы в особой расчетной ситуации



Рисунок 2. – Проектирование с учетом стратегии устойчивого развития согласно fib MS 2020²²

В настоящее время практика проектирования сейсмостойких конструкций, основанная на выходном результате, в целом, базируется на применении процедур и критериев, содержащихся в стандарте FEMA²³ и комментариях к нему²⁴.



а – Ю (непосредственное заселение); *б* – LS (безопасность жизнедеятельности); *в* – СР (предотвращение обрушения); *г* – С (обрушение)

Рисунок 3. – Уровни повреждений конструктивной системы после реализации особого события

²² См. сноску 12.

²³ См. сноску 16.

²⁴ См. сноску 17.

Комиссией CIB W060 был подготовлен отчет № 64²⁵, в котором отмечается, что «прежде всего, подход к проектированию на основе выходных результатов – это практика мышления и работы с точки зрения достижения конечных целей, а не средств, применяемых для их достижения. Это связано с тем, какие результирующие требования к параметрам поведения ожидают от здания или строительного продукта, а не с предписанием, как оно должно быть запроектировано и построено».

Это определение является самым первым и основным определением подхода к проектированию зданий, основанному на выходном результате, и до сих пор используется во многих современных исследованиях и стандартах²⁶.

Таким образом, проектирование на основе выходного результата определяется как концепция, в соответствии с которой от конструкции/конструктивной системы требуют достижения желаемого уровня удовлетворенности заинтересованных сторон выходным результатом, соблюдая при этом установленные нормами требования к выходному результату, однако без указания условий того, как этот результат должен быть достигнут с помощью конкретных материалов, конструктивных требований или методов возведения.

В соответствии с данной концепцией все принимаемые решения сосредоточены на достижении требуемых выходных результатов, а также на тестировании и оценках его основных технических параметров как непосредственно после ввода, так и в процессе эксплуатации. Данный подход можно использовать независимо от того, выполняется ли оценивание существующих или проектирование новых зданий. Он применим как при приемке возведенных строительных сооружений, так и к любой фазе/этапу всего жизненного цикла здания.

Таким образом, дополнительно принимая во внимание требования стратегии устойчивого развития, согласно *fib* MC 2020²⁷, конструкция и элементы конструкции/конструктивной системы должны быть запроектированы, возведены и обслуживаться таким образом, чтобы в течение всего жизненного цикла они функционировали адекватно и надлежащим образом отвечали требованиям к социальному, экологическому и экономическому аспектам отклика (см. рисунок 2).

Для сравнения: согласно СН 2.01.01²⁸, основной принцип проектирования формулируется следующим образом: «конструкции и элементы конструкций следует проектировать, изготавливать и обслуживать таким образом, чтобы они в течение проектного срока эксплуатации с назначенным уровнем надежности и без необоснованных экономических затрат обеспечивали выполнение следующих основных требований: несущей способности (безопасности); эксплуатационной пригодности; долговечности; живучести».

Согласно данным²⁹ и [4], концепция проектирования, ориентированного на выходной результат, основана на двух ключевых положениях:

- использовании двух языков, один из которых применяют для формулирования требований клиентов/пользователей (языка требований спроса), а другой – для задания результирующих количественных требований к целевым параметрам поведения/состояний, которые должны обеспечить удовлетворение спроса. Важно понимать, что эти языки разные;
- необходимости выполнения проверки полученных выходных результатов на соответствие целевым показателями, установленным на стадии согласования требований с заинтересованными сторонами.

Следует отметить, что с развитием методов проектирования, основанных на отклике, инженеры-практики стали лучше разбираться в их концепциях. Проектирование сейсмостойких конструкций на основе отклика стало неотъемлемой частью инженерной практики, а использование передовых методов нелинейного анализа становится все более распространенным.

Таким образом, проектирование, основанное на поведении конструкции, связанном с ее использованием (*performance-based design*), заменяет традиционный предписывающий подход к проектированию процессом проектирования, направленным на обеспечение коммуникационной связи между разрабатываемым проектом и ожидаемым выходным результатом, выраженном в функциях здания/ожидаемом ущербе, требования к которым формулируют владельцы и жильцы совместно с проектировщиками и другими заинтересованными сторонами.

Как правило, основными заинтересованными сторонами являются учредители, владельцы, жильцы, пользователи, соседи (если строительство им мешает), подрядчик, проектная и строительная группа, группа управления арендой и обслуживания. Другими заинтересованными сторонами могут быть правительство и общество. Хотя заинтересованные стороны обычно полагают, что они знают, какие критерии эффективности им следует определить для конструкции, для распознавания неполных, неоднозначных или противоречивых требований необходимы профессиональные навыки и опыт в области проектирования конструкций.

Следует отметить, что данные требования, формулируемые заказчиком (владельцем, жильцом, пользователем и т.д.), не только включают, но довольно часто превосходят традиционные требования безопасности жизнедеятельности, которые заложены в действующих в настоящее время предписывающих нормах и стандартах. Повышенные требования часто распространяются на предотвращение или ограничение до приемлемого уровня как

²⁵ Performance-Based Buildings – CIB Working Commission W060: CIB Report; Publication № 40, January, 1985.

²⁶ См. сноски 10, 12, 15, 16, 17.

²⁷ См. сноску 12.

²⁸ См. сноску 1.

²⁹ См. сноску 25.

экономических (монетарных) потерь, так и нарушения функций здания в процессе эксплуатации. Определение уровня требуемых технических характеристик конструктивной системы (уровня показателей предельного состояния) для данного сценария угроз и количественная оценка последствий для владельца/собственника в случае возникновения такой угрозы, приводящей к отказу элементов конструкции и конструктивной системы в целом, обеспечивает основу для принятия обоснованных технических решений.

При использовании данного подхода конструкцию или элемент конструкции проектируют так, чтобы они функционировали надлежащим образом в течение всего жизненного цикла, предусмотренного проектом. Эксплуатационные качества здания оценивают путем проверки соответствия поведения конструкции или элемента конструкции, связанного с ее использованием, заданным требованиям. При проектировании объектов с учетом особых расчетных ситуаций большое значение имеет не только выполнение критериев несущей способности конструкции (обеспечения безопасности жизнедеятельности), но также обеспечение непрерывности использования (функционирования), что склоняет к применению философии проектирования, опирающейся на анализ требований к отклику конструктивной системы.

Предпосылки для применения нового подхода. Основные предпосылки для практического проектирования, основанного на поведении конструкции, связанном с ее использованием, заключаются в том, что:

а) уровни требуемых технических параметров здания могут быть определены/выражены количественно и адаптированы к потребностям заинтересованных сторон;

б) методы инженерных расчетов, основанные на моделировании поведения конструкций при различных видах воздействий, развились до такой степени, что отклик здания (строительного сооружения) при монотонном возрастании нагрузки (или вынужденной деформации) до наступления анализируемого предельного состояния, в том числе во времени, с достаточной уверенностью можно предсказать численно при использовании виртуальных компьютерных моделей [1];

в) неопределенности расчетных моделей сопротивлений и эффектов воздействий можно выявить и статистически смоделировать, что даст возможность вычислить вероятности отказа конструкции/конструктивной системы;

г) существующие эмпирические модели позволяют вычислять, хотя пока и с большой неопределенностью, последствия отказа в терминах предполагаемого числа жертв;

д) вычисленные вероятности и последствия отказа дают возможность вычислить риски. При этом, риском, связанным с отказом конструктивной системы, можно управлять, снижая его до приемлемого уровня.

Новая парадигма проектирования против предписывающего подхода. Предписывающий подход описывает способ создания строительного сооружения, но не конечный результат процесса строительства, и связан с типом и качеством используемых материалов, методом строительства и качеством изготовления/возведения. Этот подход основан на прошлом опыте и консолидированных ноу-хау, строго регламентирован сочетанием законов, норм, стандартов, правил. Требования предписывающих норм и стандартов являются, как правило, следствием произошедшего несчастного случая, повлекшего за собой телесные повреждения или смерть людей, который требует средств правовой защиты, чтобы избежать повторения. Предписывающий подход представляет собой техническую процедуру, которая состоит в сравнении расчетных технических параметров проекта предлагаемого здания с требованиями действующих норм и стандартов. Поэтому для процесса проектирования и строительства не требуются инструменты, позволяющие выполнять моделирование поведения конструктивных систем или их проверки в процессе эксплуатации. Следовательно, большинство зданий проектируются так, чтобы они оставались конструктивно безопасными для жизни людей после реализации проектных событий, только с намерением того, что конструкция не обрушится в случае события, которое произойдет за пределами проектных состояний в постоянной расчетной ситуации. Даже если конструктивный ущерб будет предотвращен, весьма вероятно, что эти здания будут пустовать в течение длительного времени из-за дорогостоящего ремонта и замены несущих элементов.

Новый подход к проектированию, основанный на требованиях к выходному результату (отклику конструкции/конструктивной системы), начал формироваться, как было показано выше, во второй половине XX-го века, когда строительные рынки отдельных стран столкнулись с тем, что им нужна большая гибкость в процедурах закупок, чтобы облегчить обмен продуктами строительной отрасли и товарами между странами и повысить темпы внедрения инноваций в строительстве. Этот инновационный подход к закупкам, проектированию, заключению контрактов, управлению и обслуживанию зданий был основан на концепции проектирования зданий, ориентированного на требования к параметрам отклика или конечного результата.

При выборе концептуального подхода к проектированию следует иметь ввиду следующее обстоятельство. Несмотря на то, что конструкция запроектирована с использованием актуальных норм, правил и стандартов, основанных на установленных неявно уровнях надежности (т.н. вероятно обоснованные нормы первого поколения), никто не может гарантировать, что она не будет повреждена или не обрушится в процессе эксплуатации, особенно когда речь идет о появлении особых воздействий. Но если мы осуществим проектирование, базирующееся на требованиях к выходному результату, основываясь на количественной оценке уровня угроз и соответствующих особых воздействий, для которых рассчитывают отклик конструкции, тогда это может повысить безопасность жизнедеятельности, в частности в особых расчетных ситуациях, через реализацию процедуры управления рисками. Ключевым аспектом в предлагаемом подходе к проектированию является устойчивость конструктивной

системы, в широком смысле определяемая как способность заранее быть готовой к тому, что она будет «поглощать» прогнозируемые неблагоприятные события, «восстанавливаться» и «адаптироваться» к ним после их реализации. Данный подход одновременно усиливает и улучшает методы обеспечения общей устойчивости, контролируя потенциальный ущерб, который здание может получить от реализации особых воздействий.

Предлагаемый в настоящей работе подход к проектированию систем в особых расчетных ситуациях совместим с приведенным выше основным определением, предполагающим, что проектирование на основе параметров поведения конструкции, связанного с ее использованием, относится к мышлению и принципу работы, что соответствует больше целям, чем используемым средствам. «Проект, основанный на требованиях к отклику или выходному результату, – это проект здания, основанный на наборе специальных требований к характеристикам, связанных с предполагаемым использованием здания, и который может быть оценен на основе его поведения с учетом прогнозируемых повреждений»³⁰. Таким образом, процесс проектирования, основанный на выходном результате, определяется как «процесс, в котором требования к результирующим параметрам поведения переводятся и интегрируются в проект здания».

Здание, построенное по проекту, разработанному на основе данного подхода, должно соответствовать определенным измеримым или предсказуемым/прогнозируемым значениям конечных технических параметров, которые описывают конкретные требования к выходным результатам, таким как, например, конструктивная безопасность, энерго-эффективность, сейсмическая стойкость, огнестойкость и т.д., без применения специально предписанного метода, разработанного для достижения этих требований. Это контрастирует с требованиями традиционных предписывающих строительных норм, которые устанавливают определенные методы проектирования и строительства (например, размеры сечения стойки и расстояние между стойками в конструкции деревянного каркаса, минимальный коэффициент армирования или минимальная толщина защитного слоя в железобетонной балке и т.д.). Такой подход обеспечивает свободу при разработке и выборе инструментов и методов для оценки всего жизненного цикла строительного объекта, в том числе с применением компьютерных моделей, позволяющих создать виртуальную реальность при помощи слов от деловых отношений до закупок, строительства и оценки результатов.

Принятие данного подхода сохраняет необходимость соблюдения базовых требований действующих норм, правил, стандартов. Однако, данный подход предлагает четкие пути устранения некоторых более консервативных требований там, где они не нужны, предоставляя возможности для реализации инновационных проектных решений (конструкционных или иных), которые еще не определены и не прописаны в действующих нормах. Хотя преимущества применения данного подхода значительны, признано, что его использование на любом этапе строительного процесса является более сложным и дорогостоящим, чем использование более простого предписывающего подхода. Таким образом, применение этого подхода не следует рассматривать как самоцель. Когда речь идет о традиционном строительстве или используются хорошо зарекомендовавшие себя методы проектирования и технологии, использование предписывающих норм становится более эффективным, действенным, быстрым или менее затратным, поэтому предписывающие спецификации будут по-прежнему полезны во многих расчетных ситуациях. В то же время для сложных проектов, проектирования конструктивных систем в особых расчетных ситуациях использование подхода, основанного на результатах, эффективно на каждом этапе.

Основные отличия подходов к проектированию на основе предписывающих норм и требований к параметрам отклика можно обобщить следующим образом.

Во-первых, одно из главных отличий между рассматриваемыми подходами заключается в целях проектирования, как показано на рисунке 4. В то время как цели предписывающего проектирования требуют достижения приемлемого соотношения сопротивления и эффекта воздействия (R/E) или проверки соответствующего детерминистического неравенства ($R_d \geq E_d$), целью нового концептуального подхода является достижение определенного уровня надежности, коррелирующего с уровнем повреждения и соответствующими последствиями, которые могут быть измерены несколькими способами, включая монетарные затраты. Каждый из этих методов требует итераций в процессе проектирования до тех пор, пока не будет достигнуто приемлемое соотношение R/E (для предписывающего проектирования) или желаемый уровень предельного повреждения (последствий) (для проектирования, основанного на требованиях к выходному результату).

Еще одно различие между парадигмами предписывающего проектирования и проектирования, основанного на результирующих требованиях к отклику конструкции, заключается в их вычислительной основе. Для предписывающего проектирования это относится к соотношению сопротивление/воздействие (эффект воздействия) и основано, главным образом, на методах конструкционной надежности. Новый подход основан на методах управления рисками, которые учитывают перечень угроз, вероятности отказа и последствия реализации особого события.

Третье важное различие между этими двумя подходами заключается в шагах, которые предпринимаются при рассмотрении проектных решений. Для традиционных предписывающих методов уровень особого воздействия и допустимый уровень повреждения конструкции определяются действующими строительными нормами и стандартами, как правило, неясно в терминах усилий (эффектов воздействий). При проектировании, основанном на поведении конструкции, связанном с ее использованием, помимо этих уровней в процессе проектирования учитывают также ожидаемые последствия и неопределенности. Эти решения основаны на допуске уровня предельных повреждений, а не на заранее определенном наборе норм и правил.

³⁰ См. сноску 12.

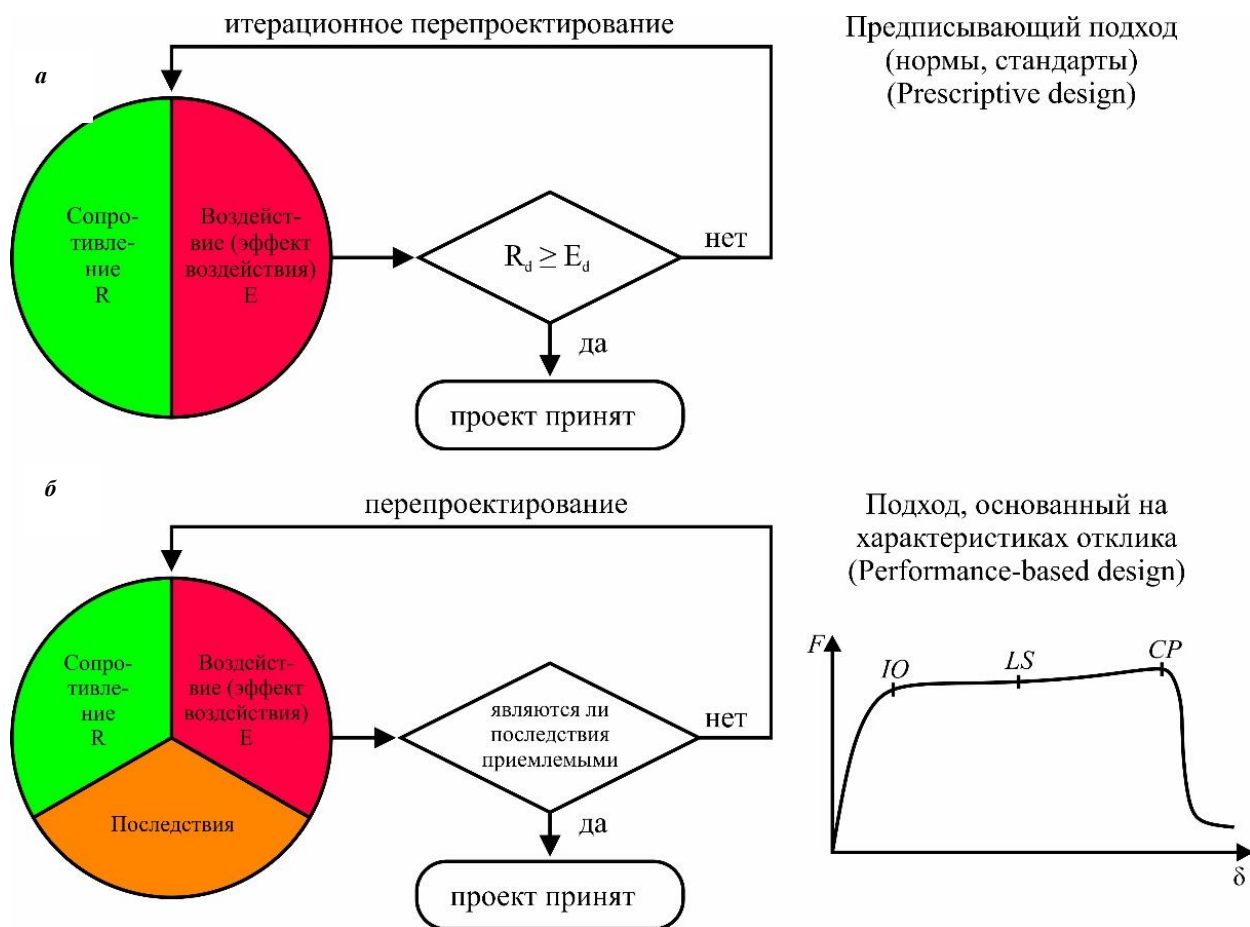


Рисунок 4. – Принципиальные схемы реализации предписывающего подхода к итерационному проектированию (а) и подхода, основанного на выходном результате (б)

Благодарности. Исследование выполнено в рамках отдельного проекта научно-исследовательской работы Министерства образования Республики Беларусь «Разработка методики установления допустимых значений мер надежности в критериях живучести поврежденных конструктивных систем из железобетона, применяемых при проверках их устойчивости к прогрессирующему обрушению от чрезвычайных воздействий» (№ гос. регистрации 20231582).

ЛИТЕРАТУРА

1. Лизогуб А.А., Тур А.В., Тур В.В. Вероятностный подход к оценке живучести конструктивных систем из сборного и монолитного железобетона // Стр-во и реконструкция. – 2023. – Т. 108, № 4. – С. 93–105.
2. Proske D., Schmidt M. Comparison of the collapse frequency and failure probability of buildings / Acta Polytechnica CTU Proceedings. – 2022. – Vol. 36. – P. 161–166. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0161.
3. Колубков А.А. Параметрический метод нормирования. Постоянное стремление к изменениям [Электронный ресурс] // АВОК. – 2023. – № 8. URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=8588.
4. Galinski J.L. Performance-Based Design // Continuing Education and Development. – NJ: Woodcliff Lake, 2023. – 17 p.

REFERENCES

1. Lizogub, A.A., Tur, A.V. & Tur, V.V. (2023). Veroyatnostnyi podkhod k otsenke zhivuchesti konstruktivnykh sistem iz sbornogo i monolitnogo zhelezobetona [Probabilistic Approach for Assessing the Robustness of Structural Systems Made of Precast and Monolithic Reinforced Concrete]. *Str-vo i rekonstruktsiya [Building and Reconstruction]*, 108(4), 93–105. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Proske, D. & Schmidt, M. (2022). Comparison of the collapse frequency and failure probability of buildings. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, (36), 161–166. DOI: 10.14311/APP.2022.36.0161.
3. Kolubkov, A.A. (2023). Parametricheskii metod normirovaniya. Postoyannoe stremlenie k izmeneniyam [Parametric Normalization Method. Constant Desire for Change]. *ABOK*, (8). URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=8588. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Galinski, J.L. (2023). Performance-Based Design. *Continuing Education and Development*. NJ: Woodcliff Lake.

Поступила 30.11.2024

PERFORMANCE BASED DESIGN METHODOLOGY FOR VERIFICATION THE ROBUSTNESS OF STRUCTURAL SYSTEMS IN ACCIDENTAL DESIGN SITUATIONS. PART 1**A. TUR****(Brest State Technical University)**

Approaches to the design and/or checking of structural systems in accidental design situation included in prescriptive regulatory and technical documents not only do not have a single/uniform methodological basis, but in some cases establish unrelated verification criteria and safety formats. With regard to checking of structural systems in accidental design situations, the most rational approach to design can be considered based on the response/behavior (performance based design) of a structural system or, in other words, the output result (outcomes-based design), the general provisions of which for the design conditions of RC – structural systems are set out in fib MC 2020. According to this document, performance-based design is an engineering approach to the design of building elements based on agreed design goals and objectives, engineering analysis and quantitative assessment of the compliance of alternatives with the set design goals and objectives using accepted engineering tools, methodologies and criteria for acceptance of the output/outcomes result. The article presents the main provisions of the new paradigm of designing constructive systems based on the output result.

Keywords: *robustness, accidental design situation, performance-based design, response, damage level.*