УДК 624.012 DOI: 10.33979/2073-7416-2025-117-1-72-90

А.В. ТУР [1]
[1] Брестский государственный технический университет, г. Брест, Беларусь

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ МЕР НАДЁЖНОСТИ ПРИ ПРОВЕРКАХ ЖИВУЧЕСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ СИСТЕМ В ОСОБЫХ РАСЧЁТНЫХ СИТУАЦИЯХ

Аннотация. *Научно-обоснованное назначение целевых значений мер надежности является первым и одним из наиболее важных шагов, как при калибровке системы частных коэффициентов, включенных как в современные предписывающие нормы проектирования конструкций, так и при выполнении проверок предельных состояний на основе прямых вероятностных расчетов и расчётов рисков в рамках новой парадигмы проектирования, основанного на выходном результате или отклике.*

В исследованиях в качестве минимальных допустимых мер надёжности приняты пороговые значения вероятностей отказа и соответствующих индексов надёжности, полученные на основе базового требования обеспечения безопасности жизнедеятельности. Данный подход реализован с использованием LQI-критерия, при вычислении константы относительных затрат на спасение жизни, для социально-экономических условий Республики Беларусь. Пороговые значения параметров принятия решения, полученные из условий обеспечения безопасности жизнедеятельности, определяют границу области, в которой следует выполнять экономическую оптимизацию мер надёжности.

Установлены целевые значения параметров надёжности, применяемые при проверках живучести в особых расчётных ситуациях, для социально-экономических условий Республики Беларусь, что позволяет обоснованно выполнить калибровку глобального коэффициента безопасности при выполнении нелинейного анализа поврежденных конструктивных систем. Из сравнения основных индикаторов социально-экономического развития можно заключить, что полученные меры надёжности применимы, с незначительными корректировками, и к условиям Российской Федерации.

Ключевые слова: *особая расчётная ситуация, проверки живучести, меры надёжности, конструктивная система.*

A.V.TUR [1]
[1] Brest State Technical University, Brest, Belarus

DIFFERENTIATION OF THE TARGET RELIABILITY MEASURMENTS FOR STRUCTURAL SYSTEMS ROBUSTNESS CHECKING IN ACCIDENTAL DESIGN SITUATIONS

Abstract. *The scientifically based assignment of target values of reliability measures is the first and one of the most important steps, both when calibrating the system of partial coefficients included in modern prescriptive standards for the design of structures, and when performing limit state checks based on direct probabilistic calculations and risk calculations within the framework of a new design paradigm based on the performance-based output result or a response.*

In the research, threshold values of failure probabilities and corresponding reliability indices, obtained on the basis of the basic requirement for ensuring life safety, are used as minimum acceptable reliability measures. This approach is implemented using the LQI- criterion, when calculating the constant of the relative cost of saving lives, for the socio-economic conditions of the Republic of Belarus. The threshold values of the decision-making parameters obtained from the conditions for ensuring the safety of life determine the boundary of the area in which the economic optimization of reliability measures should be performed.

© Тур А.В., 2025

The target values of reliability parameters used in survivability checks in special design situations for the socio-economic conditions of the Republic of Belarus have been established, which makes it possible to reasonably calibrate the global safety coefficient when performing a nonlinear analysis of damaged structural systems. From a comparison of the main indicators of socio-economic development, it can be concluded that the reliability measures obtained are applicable, with minor adjustments, to the conditions of the Russian Federation.

Keywords: *accidental design situation, robustness checking, reliability measurements, structural system.*

Введение

В соответствии с требованиями норм [1] проверки предельных состояний конструкций в рамках предписывающего вероятностного проектирования выполняют с использованием вероятностных моделей сопротивлений и воздействий, путём сравнения вычисленных мер надежности (значений вероятностей отказа P_f и связанных с ними индексов надежности β_f) с их допустимыми целевыми значениями, установленными в нормативных документах (P_{tag} и β_{tag}). В общем случае процедуру оценивания надежности конструкции можно считать полной, если адекватно определены сравниваемые меры надежности как в левой, так и в правой частях базового критерия согласно [1] (неравенства вида $P_f \le P_{tag}$ или $\beta_f \ge \beta_{tag}$).

Таким образом для проверки надежности поврежденной конструкции/конструктивной системы в рамках принятой концепции метода предельных состояний, следует ответить, как минимум, на следующие вопросы:

1. Какова допустимая или целевая вероятность отказа, которая может быть принята в качестве нормируемой меры надежности в особой расчётной ситуации, когда выполняется оценка живучести поврежденной конструктивной системы?

2. Для какого уровня оценивания (отдельный элемент конструкции, конструкция или конструктивная система в целом) следует выполнять нормирование мер надежности? Определять ли вероятности отказа элемента конструкции или конструктивной системы в целом? Как соотносятся эти вероятности?

3. Следует ли постоянно прибегать к вычислению вероятностей отказа конструкции или можно использовать упрощенные методы, обеспечивающие неявное достижения целевого уровня надежности, в том числе, с использованием глобальных коэффициентов безопасности при выполнении нелинейных расчётов конструктивной системы в целом.

Как было показано в работах [12, 13], ответы на поставленные вопросы должны быть даны с учетом особенностей, присущих оцениванию надежности строительных конструкций, которые, в общем случае, были сформулированы в [2].

Следует отметить, что особенности, приведенные в [2], характерны для условий нормальной эксплуатации, когда предполагается, что отказ здания наступает «естественным» путём, например, в результате деградации свойств материалов при агрессивных воздействиях за полный жизненный цикл. Однако, при наступлении особых расчётных ситуаций частота обрушений зданий, возведенных примерно в одно время с использованием предписывающих норм, в основу которых положены близкие значения целевых мер надёжности, возрастает. Разработка унифицированных методов проектирования железобетонных конструкций, включенных в Кодекс – образец (***fib*** Model Code 2020) [4], а далее – в систему Еврокодов [5, 6], создаёт дополнительные возможности для анализа аварий строительных сооружений по данным различных стран, в частности, принимая во внимание особые расчётные ситуации.

В нашей статье [2] были детально проанализированы общепринятые подходы к назначению допустимых целевых мер надежности, внесенных в действующие СН 2.01.01-2020 [1], ТКП-EN1990 [5], проект нового prEN1990 [7], СТБ-ISO 2394:2015 [8], сформулированы собственные предложения, касающиеся определения целевой вероятности отказа как для отдельных элементов конструкции, так и конструктивных систем в целом в условиях нового строительства.

Значения параметров надёжности, включенные в нормативные документы в качестве допустимых или целевых, зависят от многих параметров, на которые оказывает влияние социально-экономические условия страны, включая последствия отказа (например, социальные последствия и влияние на экономику региона, пострадавшего от отказа), относительные затраты на меры безопасности, моральный износ/амортизация и процентные ставки дисконтирования. Целевые меры надежности, включенные в ТКП-EN 1990 [5] и СН 2.01.01 [1], являются индикативными *для социально-экономических условий развитых* стран и установлены на основе экономической (монетарной) оптимизации.

Для условий развивающихся стран и регионов, могут быть установлены *более низкие* целевые значения мер надёжности с учетом соответствующих социально-экономических индикаторов, используя, например, подход, основанный на т.н. «индексе качества жизни» (LQI), изложенный в ISO 2394:2015 [8]. В специальных случаях, в частности при проектировании конструктивной системы в особых расчётных ситуациях, определение целевых мер надежности, по нашему мнению, следует устанавливать путем вероятностной оптимизации риска, принимая LQI-критерий в качестве ограничения целевой функции.

Проблема принятия решения при установлении целевых значений вероятностных мер надежности конструктивных систем может быть сформулирована следующим образом: ***Инвестирование в конструктивную безопасность снижает вероятность появления нежелательного события (обозначаемого как "отказ"), которое может приводить к монетарным (экономическим) и гуманитарным (человеческим) потерям (последствиям).***

При этом следует иметь ввиду, что социальные/общественные ресурсы, направляемые на спасение жизней всегда ограничены, и их необходимо инвестировать в наиболее эффективные и доступные меры по снижению риска. Оптимального распределения ресурсов при оценке решений, касающихся снижения риска для жизни человека можно достичь, применяя ***принцип предельных затрат на спасение жизни MLSC*** (англ.- *Marginal Life Saving Costs Principle*), в соответствии с которым, согласно ISO 2394:2015 [8 с.15] *"принимаемые решения, оказывающие влияние на безопасность жизнедеятельности человека считаются приемлемыми, если расходы, связанные с инвестированием в возможные меры, направленные на спасение одной дополнительной/анонимной жизни сбалансированы затратами, которые общество готово нести ради спасения одного статистического индивида".* Для получения количественных критериев допустимого риска предельные затраты на спасение жизни необходимо сравнить с общественной готовностью платить (SWTP) за даже незначительное повышение безопасности жизнедеятельности, которое можно определить с помощью индекса качества жизни (LQI).

Таким образом, целевые требования к надежности конструкций следует устанавливать на ***национальном уровне.*** При этом, требования надежности устанавливают, как правило, опираясь на анализ рисков с учетом следующих аспектов:

– минимальные требования надежности зависят от социально-экономического потенциала общества и его готовности инвестировать в безопасность жизнедеятельности каждого человека;

– целевые требования надежности, предъявляемые к конструкции, зависят от ожидаемых последствий отказа, включая расходы, связанные с проектированием, возведением, обслуживанием, ремонтами в течение некоторого реферативного периода времени, для которого она проектируется (как правило, полного жизненного цикла).

При этом, требования надежности должны быть выполнены для всех возможных сценариев отказа, включая как отказ отдельного элемента, разрушение значительной части или всей конструктивной системы в целом. При проверках живучести строительных сооружений в особых расчётных ситуациях калибровка значений глобальных коэффициентов

безопасности становится важнейшей проблемой, которая связана с нормированием допустимых значений мер надёжности для поврежденной системы.

Модели и методы исследований

Вероятностная оптимизация целевых мер надежности

Научно-обоснованное назначение целевых значений мер надежности является первым, и, по-видимому, одним из наиболее важных шагов, как при калибровке системы частных коэффициентов, включенных как в современные предписывающие нормы проектирования конструкций, так и при выполнении проверок предельных состояний на основе прямых вероятностных расчетов и расчётов рисков в рамках новой парадигмы проектирования, основанного на выходном результате или отклике согласно [4].

Как было показано ранее в наших работах [2], практически все нормы, содержащие требования к основам проектирования, включая и *Probabilistic Model Code* [9], устанавливают индикативные значения целевых мер надежности, рассматривая отказы на уровне конструктивной системы (PMC JCSS [9]), либо на уровне отдельного элемента конструкции (ТКП-EN1990 [5], ISO 2394 [8] и т.д.) при доминирующей форме отказа системы и основываясь, главным образом, на ***монетарной оптимизации*** (англ. *Monetary optimization)* или оптимизации экономических затрат [8].

Вместе с тем, ISO 2394:2015 [8] (Приложение G) содержит указания по выполнению оптимизации мер надёжности, основанной на критерии обеспечения безопасности жизнедеятельности (т.н. *LQI* - критерий). На рисунке 1 схематически показано взаимодействие между параметрами безопасности (параметрами принятия решений), устанавливаемыми на основе положений монетарной/экономической оптимизации p^* и граничными (пороговыми) значениями p_{acc} установленными из условия обеспечения безопасности жизнедеятельности (критерия допустимого риска для жизни людей).

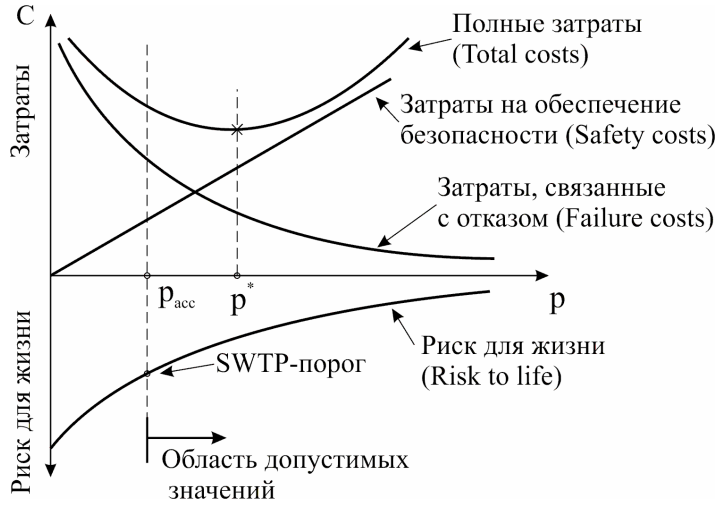

Рисунок 1 – Взаимодействие критериев монетарной/экономической оптимизации p^* и социального критерия p_{acc1}, связанного с инвестированием общества в безопасность жизнедеятельности [8]

При калибровке целевых значений вероятностных мер надежности, с одной стороны, определяют некоторое оптимальное значение параметра принятия решения p^* (как уровня обеспечения безопасности конструкции, определяемого в общем случае как отношение среднего значения сопротивления к среднему значению эффекта воздействия $p = \gamma_G = \mu_R/\mu_E$) на основе монетарной оптимизации, а с другой- минимального (порогового) значения параметра принятия решения p_{acc}, определяющего границу допустимой области параметра p, в пределах которой следует выполнять монетарную оптимизацию.

В настоящей работе принята следующая ***предпосылка***: *при проверках конструктивных систем в особых расчётных ситуациях в качестве минимальных допустимых мер*

надёжности приняты пороговые значения вероятностей отказа и соответствующих индексов надёжности, установленные при помощи LQI-критерия из условия обеспечения безопасности жизнедеятельности.

Вероятность отказа $P_f(p)$ определяют, используя простую *функцию состояния с параметром принятия решения в виде т.н. глобального коэффициента безопасности*:

$$P_f(p) = P_{rob}\left[(R-E)<0\right]. \tag{3}$$

Согласно [10, 11] зависимость вероятности отказа от параметра приятия решения p (глобального коэффициента безопасности γ_G) в первом приближении может быть определена в предположении логнормального (LN) распределения как сопротивления, так и эффектов воздействий по формуле:

$$P_f(p) = p\left[g = R-E<0\right] = \Phi\left[\frac{\ln\left(\frac{1}{p}\sqrt{\frac{V_R^2+1}{V_E^2+1}}\right)}{\sqrt{\ln\left(\left(V_R^2+1\right)\left(V_E^2+1\right)\right)}}\right]. \tag{4}$$

Затраты на возведение $C(p)$ строительного сооружения моделируют линейной функцией глобального коэффициента безопасности:

$$C(p) = C_0 + C_1 p\,, \tag{5}$$

и тогда целевая функция монетарной оптимизации согласно [2, 10] может быть сформулирована следующим образом:

$$\min_p\left\{T(p) = \left[C_0 + C_1 p\right] + \left[\left(C_0 + C_1 p\right)\frac{\omega}{\gamma}\right] + \left[C_0 + C_1 p + H\right]\frac{P_f(p)}{\gamma}\right\} \tag{6}$$

Связывая все компоненты затрат с “фиксированной” стоимостью возведения C_0, оптимальный уровень надежности может быть определен как функция затрат на обеспечение конструктивной безопасности и ущерба от отказа. Следует отметить, что классы по последствиям отказа в ТКП-EN1990 [5] и ISO 2394:2015 [8] определены с учетом относительной стоимости мер безопасности C_1/C_0, коэффициента морального износа ω и коэффициентов вариации сопротивлений и эффектов воздействий V_R и V_E соответственно.

Вместе с тем, ISO 2394:2015 [8] устанавливает требование, в соответствии с которым *целевая вероятность отказа может быть определена на основе монетарной оптимизации только тогда, когда* ***минимизирован риск утраты человеческой жизни*** *в результате обрушения конструктивной системы (другими словами – определено предельное или пороговое значение меры надежности).*

Если данное требование не выполняется, т.е. мера надёжности, определенная на основе монетарной оптимизации, не превышает величину ограничения, вытекающего из критерия обеспечения безопасности жизнедеятельности, для определения предельных целевых значений мер надёжности *следует использовать LQI-критерий*. В работах [10-13] основываясь на LQI-критерии, был выведен т.н. показатель предполагаемых затрат на предотвращение смертельных исходов ICAF (*Implied Costs to Avert a Fatality*), который был использован в работах [10-13] для вероятностной оптимизации строительных конструкций.

Получение минимальных целевых мер надежности на основе критерия LQI

При формулировании критерия, применяемого для оценивания пороговых значений целевых мер надёжности, основанного на LQI, предельные затраты на сохранение жизни следует выделить из целевой функции (6). Опираясь на положения ISO 2394:2015 [8], можно сформулировать следующее правило: *при установлении критерия, основанного на LQI достаточно количественно определить предельный прирост затрат на возведение и моральный износ конструкции при соответствующем изменении (снижении) риска для жизни (см. рисунок 1), в зависимости от параметра принятия решения. Приемлемую область допустимых решений можно определить с помощью следующего критерия:*

$$-\frac{dP_f(p)}{dp} \le \frac{C_1(\gamma_s + \omega)}{\frac{g}{q} C_x \cdot N_F} = k_1. \qquad (7)$$

Числитель правой части неравенства (7) $C_1(\gamma_s + \omega)$ показывает, насколько возрастают годовые затраты, связанные с обеспечением мер конструктивной безопасности при повышении на единицу параметра принятия решения p (глобального коэффициента безопасности γ_G). В знаменателе правой части неравенства (7) в монетарных единицах приведены последствия утраты N_F человеческих жизней в результате отказа. Таким образом, *коэффициент* k_1 *содержит информацию о соотношении затрат на обеспечение мер конструктивной безопасности и расходов, связанных с предельными затратами на сохранение человеческой жизни (SWTP).* Рисунок 2 иллюстрирует общий алгоритм количественной оценки порогового значения $p_{f,acc}$.

Рисунок 2 - Схема определения целевых значений вероятности отказа $p_{f,acc}$ на основе LQI-критерия обеспечения безопасности жизнедеятельности согласно [10]

Таким образом*, константа* k_1 *является мерой, связывающей затраты на обеспечение безопасности конструкции с монетизированными последствиями отказа в терминах утраты человеческих жизней в случае наступления отказа.*

Определение минимальных целевых значений мер надёжности на основе LQI-критерия для социально-экономических условий Республики Беларусь

Калибровки основных социально-экономических индикаторов

Прежде, чем перейти к установлению нормируемых минимальных мер надёжности, применяемых при проверках конструктивных систем в особых расчётных ситуациях, были выполнены калибровки основных социально-экономических индикаторов, входящих в расчётные модели определения пороговых значений параметров принятия решения и вероятностей отказа исходя из требований обеспечения безопасности жизнедеятельности для социально-экономических условий Республики Беларусь. Следует отметить, что уровень

проработки их соответствует поставленной задаче *укрупненного* определения показателей надёжности для целей нормирования, поэтому некоторые из них были приняты консервативно, как и в работе [14] для периода 2010-2020г.г. Результаты расчёта основных затрат, которые экономически целесообразно инвестировать в безопасность жизнедеятельности для условий Республики Беларусь представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет затрат, которые экономически целесообразно инвестировать в безопасность жизнедеятельности для условий Республики Беларусь

№ п/п	Расчетный параметр, источник	Ед. изм.	Годы		
			2021	2022	2023
1	Ожидаемая продолжительность жизни при рождении *e*, [17-20]	год	76,3	76,4	76,7
2	ВВП, *G* [17-20]	млрд. руб.	173,2	191,4	198,1
		млрд. долл. США	68,21	62,40	60,00
3	Численность населения *P*, [21,22]	тыс. чел.	9255	9200	9200,6
4	в т. ч. занятого в экономике *M*, [21,22]	тыс. чел.	4300	4215	4148
5	Денежные доходы на душу населения в месяц *W*, [21-23]	руб.	908,2	1027,1	1100,2
6	Валовый продукт на душу населения $g = G / P$	руб.	18542	20804	21532
		долл. США	7302	6782	6522
7	Коэффициент соотношения продолжительности труда к отдыху $w = \frac{h \cdot M}{P}$	-	0,110	0,109	0,108
8	$\beta = \frac{12 \cdot W}{g}$	-	0,615	0,600	0,598
9	Коэффициент, зависящий от активной фазы жизни $q = \frac{w}{\beta \cdot (1-w)}$	-	0,200	0,200	0,200
10	$\mathrm{ICAF} = \frac{g \cdot e}{0.25 \cdot q}$	тыс. руб.	1768,0	1986,8	2064,4
		тыс. долл. США	696,4	647,7	625,3
11	$\mathrm{LQI} = \frac{g^q \cdot e}{\text{год}}$	руб.	544,7	558,1	564,2
		долл. США	452,07	446,0	444,2
12	$SWTP = \frac{g}{q} \cdot C_X$	тыс. руб.	3244	3640	3768
		тыс. долл. США	1278	1186	1141

Результаты исследования и их анализ

С учётом результатов анализа, выполненного специально для определения ожидаемого числа жертв, была принята эмпирическая модель R. Hingorani и др. [15] в виде эмпирического выражения:

$$N_F = 0.72 Ocu_{col}^{0.515} A_{col}^{0.051}, \quad N_F \geq 1. \qquad (8)$$

Следует отметить, что приведенная модель (8) имеет ряд ограничений, которые следует учитывать при анализе: (а) площадь обрушения, принимаемая в расчёт изменяется от $A_{col,min}$ =

20 м^2 до $A_{col,тфч}$ = 2400 м^2; (б) коэффициент заполняемости (количество людей на 1 м^2 площади) $Осu_{col}/A_{col}$ на момент обрушения варьируется от 1/270 до 1/3 (чел./м^2). Принятый диапазон коэффициента заполняемости позволяет охватить все классы последствий.

Результаты вычисления потенциального числа жертв N_F для данной площади обрушения A_{col} и коэффициента заполняемости $Осu_{col}$, а также отношение $n_F = N_F/A_{col}$, показывающее удельное число жертв на единицу площади обрушения показаны на рисунках 3 и 4. Как видно из полученных результатов вычислений, (см. рисунки 3 и 4) с увеличением площади обрушения A_{col} (при отношении $Осu_{col}/A_{col}$ = const) абсолютное число жертв N_F возрастает, а удельное число n_F – убывает, вне зависимости от коэффициента заполнения (класса по последствиям). Введение удельной характеристики для оценки числа жертв (чел./м^2) было обусловлено тем, что при вычислении константы k_1 принята фиксированная удельная стоимость возведения C_0 из которой, пользуясь отношением C_1/C_0 определяли стоимость мер конструкционной безопасности (в USD/м^2). Вместе с тем, графики на рисунках 3 и 4 явно показывают влияние масштабного фактора (размеров конструктивной системы) на значения целевых мер надёжности, даже при условии нормализации к площади обрушения A_{col}.

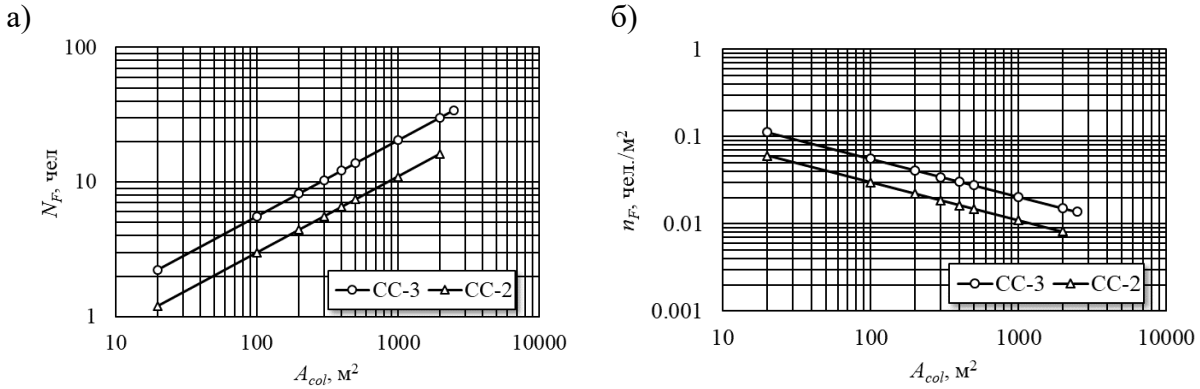

Рисунок 3 – Зависимость общего N_F (а) и удельного n_F (б) числа жертв от площади обрушения по модели R.Hingorani [15]

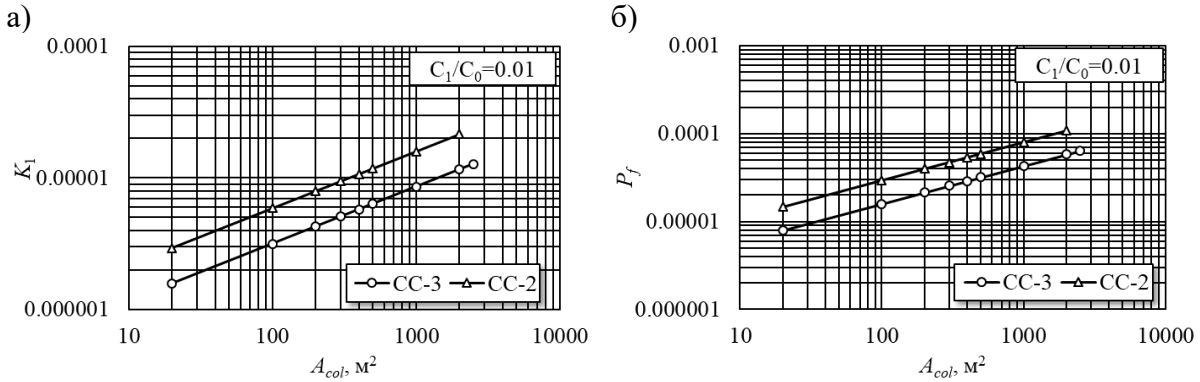

Рисунок 4 – Зависимость константы K_1 (а) и вероятности отказа P_f (б) от площади обрушения по модели R.Hingorani [15]

Классы последствий

Для дифференциации мер надежности классы последствий (СС) установлены с учетом потенциальных последствий отказа в зависимости от типа конструкции, ее использования и обеспечения живучести после появления локальных/инициирующих повреждений.

Основываясь на положениях единого методологического подхода, для зданий независимая дифференциация мер надежности может быть выполнена исключительно на основе *потенциальных последствий для жизни людей*, связанных с *конкретным* сценарием обрушения, которые согласно [15] зависят от следующих параметров:

- масштабов ущерба в соответствии со сценарием обрушения, количественно *выраженных посредством прогнозируемой площади обрушения здания A_{col} (по существу, площадь обрушения, явно присутствующая в моделях последствий, неявно выражает потенциальное число жертв)*;

- коэффициента заполняемости данной площади, $\mu_{Ai} = Ocu_{col}/A_{col}$ (количество лиц, подвергающихся риску Ocu_{col}, приходящихся на единицу площади A_{col}).

Коэффициент заполняемости $\mu_{Ai} = Ocu_{col}/A_{col}$ (чел/м^2), относящийся к конкретному сценарию обрушения элемента конструкции, также может использоваться для определения класса последствий СС согласно [1, 5]. Классификация конструкций по последствиям отказа может быть представлена следующим образом:

– **СС1**: небольшое число людей *N*, подвергающихся риску в зоне обрушения; $\mu_{Ai} \leq 0{,}01$ (типичными примерами являются помещения в зданиях, в которых люди обычно бывают довольно редко, например, сельскохозяйственные объекты); для конструктивных систем данного класса при проверках конструктивных систем в особых расчётных ситуациях считается достаточным выполнение предписывающих норм проектирования без специальных требований и проверок;

– **СС2**: среднее число людей *N* в пределах прогнозируемой площади обрушения *Acol*, при выполнении условия $0{,}01 < \mu_{Ai} \leq 0{,}1$ (примеры – жилые и офисные помещения, за исключением мест скопления людей);

– **СС3**: большое число людей *N* в пределах прогнозируемой площади обрушения *Acol*, при выполнении условия $\mu_{Ai} > 0{,}1$ (примеры – помещения для собраний, включая вестибюли, вестибюли, залы ожидания, конференц-залы/пресс-центры, актовые залы, спортивные и плавательные комплексы, трибуны, кинотеатры, театры, музеи, аудитории, классные комнаты и тому подобное).

В тех случаях, когда в пределах прогнозируемой области обрушения могут быть выделены участки с различными коэффициентами заполняемости, для установления класса последствий СС принимают более консервативное или средневзвешенное значение. Коэффициент заполняемости $\mu_{Ai} = Ocu_{col}/A_{col}$ может зависеть также от характера рассматриваемого режима отказа (формы разрушения). Учитывая то обстоятельство, что пластическая форма разрушения обеспечивает пользователям достаточно раннее предупреждение о необходимости своевременной эвакуации из здания, такой сценарий консервативно исключают при оценке коэффициента заполняемости, если возможность эвакуации не будет детально проанализирована.

Определение константы K_1 и вычисление вероятности отказа

Как было показано выше, простой формат для определения минимального целевого значения мер надёжности на основе критерия приемлемости LQI может быть получен, связав пороговую надёжность с константой относительных затрат на спасение жизни K_1, определяемой по формуле:

$$K_1 = \frac{C_1\ (\gamma_S + \omega)}{\frac{g}{q} C_x n_F} = \frac{C_1\ (\gamma_S + \omega)}{SWTP\ n_F} \quad \text{и} \tag{9}$$

$$p_{f,acc} \approx \frac{1}{5} K_1. \tag{10}$$

Как было показано ранее, значения константы K_1 содержат информацию о затратах на конструкционную безопасность $C_1\ (\gamma_S + \omega)$, о последствиях отказа n_F, и SWTP для обеспечения безопасности жизнедеятельности. Следует отметить, что на полученные в результате расчётов целевые значения константы K_1 дополнительно влияют допущения, сделанные относительно распределений базисных переменных в функции состояния для конструкции и статистических

параметров изменчивости базисных переменных. В работах [10, 11] было показано, что несмотря на неизбежные различия в записи функции предельного состояния, имеет место общая тенденция изменения целевого значения вероятности отказа $p_{f,acc}$ в зависимости от константы K_1: *увеличение константы относительных затрат на спасение жизни K_1 на один порядок приводит к изменению на порядок целевой вероятности отказа $p_{f,acc}$, которая считается допустимой, опираясь на критерий LQI.* Как показано в работах [10, 11] это утверждение справедливо в широком диапазоне изменчивости моделей сопротивлений и воздействий и, поэтому может быть использовано для получения простого формата целевых уровней надёжности, опираясь на LQI-критерий обеспечения безопасности жизнедеятельности (см. ф (9) и (10)).

Как отмечалось ранее, предложенная модель содержит монетарные затраты на обеспечение конструктивной безопасности C_1 выраженные в долях от фиксированной стоимости строительства (без учёта затрат на проектирование), в результате чего проявляется эффект масштабирования. В качестве базовой стоимости строительства жилых и офисных зданий для социально-экономических условий Республики Беларусь было принято среднее значение C_0=1000USD/м^2. При этом принимали значения для зданий ω=2%, а средняя ставка социального дисконтирования 8%. Значения SWTP, вычисленные по данным для периода оценивания 2021-2023 г.г. приведены в таблице 1.

Следует отметить, что при вычислении константы K_1, авторы [10] используют ещё одно упрощение, связанное с определением удельного потенциального числа жертв n_F в уравнении (9). Для того, чтобы исключить влияние масштабного фактора, вытекающего из соотношения площади обрушения A_{col} (и, следовательно, потенциального числа жертв N_F из модели последствий) и площади нетто всего здания A_{floor}, в знаменателе уравнения (9) вместо n_F используют коэффициент заполнения μ_{Ai} (чел./м^2), принимаемый для соответствующего класса последствий СС. При данном подходе удельное число жертв является константой для выделенных категорий нагрузочных площадей и классов последствий и не зависит от площади обрушения. Такой упрощенный подход может быть вполне оправдан для установления некоторых обобщенных мер надёжности, применяемых для калибровки частных коэффициентов или при выводе глобального коэффициента безопасности. Целевые значения мер надёжности, откалиброванные для соответствующих классов последствий СС и относительной стоимости мер безопасности C_1 / C_0, полученные опираясь на константу относительных затрат на спасение жизни K_1, полученную с применением LQI-критерия (Таблица 2) представлены в таблице 3.

Таблица 2 – Значения константы K_1 относительных затрат на спасение жизни для условий Республики Беларусь

Класс последствий	Коэффициент заполнения	Относительная стоимость конструкционных мер безопасности C_1/C_0		
		0.001	0.01	0.1
CC1	$0.01 \le \mu_{Ai}$	1.3E-05	1.3E-04	1.3E-03
CC2	$0.01 < \mu_{Ai} \le 0.1$	(0.7..2.3)E-06	(0.7..2.3)E-05	(0.7..2.3)E-04
CC3	$\mu_{Ai} > 0.1$	(1.7..3.5)E-07	(1.7..3.5)E-06	(1.7..3.5)E-05

Таблица 3 – Годовые значения целевых мер надежности, установленные из условия обеспечения безопасности жизнедеятельности на основе LQI-критерия

Класс последствий	Коэффициент заполнения	Относительная стоимость конструктивных мер безопасности C_1/C_0		
		0.001	0.01	0.1
CC1	$0.01 \le \mu_{Ai}$	3E-06 ($\beta \approx 4.53$)	3E-05 **($\beta \approx 4.01$)**	3E-04 ($\beta \approx 3.43$)
CC2	$0.01 < \mu_{Ai} \le 0.1$	5E-07 ($\beta \approx 4.89$)	5E-06 **($\beta \approx 4.42$)**	5E-05 ($\beta \approx 3.89$)
CC3	$\mu_{Ai} > 0.1$	7E-08 ($\beta \approx 5.27$)	7E-07 **($\beta \approx 4.83$)**	7E-06 ($\beta \approx 4.34$)

Влияние масштабного фактора

В соответствии с [15] годовое значение вероятности отказа и соответствующее значение индекса надёжности β_{LQI},получают рассматривая:

- средний уровень относительной стоимости мер безопасности (снижения риска) (C_1 / C_0)= 0.005-0.01;

- ожидаемое удельное число жертв $n_F = N_F/A_{floor}$(чел./м.кв.) для класса:

$$\text{CC2:} \quad N_F/A_{floor} = D(0.59A_{col}^{0.5}\text{-}1)/A_{col} \geq 0 \qquad (11)$$

$$\text{CC3:} \quad N_F/A_{floor} = D(0.59A_{col}^{0.56}\text{-}1)/A_{col} \geq 0 \qquad (12)$$

При этом принимают допущение о том, что коэффициент распространения повреждений $D = A_{col}/A_{floor}$ является известным. Рассчитанные годовые значения константы K1 для социально-экономических условий Республики Беларусь приведены в таблицах 4 и 5 в зависимости от прогнозируемой площади обрушения A_{col}, моделирующей последствия, удельных затрат на конструкционную безопасность и коэффициента заполняемости в зависимости от класса последствий (CC2 и CC3).

Таблица 4 – Годовые значения константы K_1 для зданий класса CC2 для условий Республики Беларусь

A_{col}, м^2	N_F, чел	$n_F=N_F/A_{col}$, чел/м^2	Относительная стоимость конструкционных мер безопасности C_1/C_0		
			Малая (0.001)	Средняя (0.01)	Большая (0.1)
100	3	3.00E-02	5.84E-07	5.84E-06	5.84E-05
200	4	2.00E-02	8.76E-07	8.76E-06	8.76E-05
300	6	2.00E-02	8.76E-07	8.76E-06	8.76E-05
400	7	1.75E-02	1.00E-06	1.00E-05	1.00E-04
500	7	1.40E-02	1.25E-06	1.25E-05	1.25E-04
1000	11	1.10E-02	1.59E-06	1.59E-05	1.59E-04
2000	16	8.00E-03	2.19E-06	2.19E-05	2.19E-04

Примечания:

1) потенциальное количество жертв N_F определено согласно [15] по формуле (8) при μ_{Ai} = 1/10 для класса CC2;

2) значения константы K_1 определены по формуле (9) при ω = 2%; $\overline{\gamma}_s$ = 8%;

3) стоимость возведения принята как среднее удельное значение C_0=1000 USD/м^2 – для жилых зданий.

На первом этапе анализа было принято решение об отнесении затрат на конструктивную безопасность и последствий в терминах числа жертв к единице площади обрушения A_{col} (в данном случае формально считается, что коэффициент $D = 1$). Изменение константы K_1 в зависимости от относительной стоимости мер конструктивной безопасности показано в таблицах 4 и 5, а от потенциальной площади обрушения – на рисунке 4а. Как видно из графиков приведенных на рисунке 4а, не смотря на снижение относительного числа жертв n_F при возрастании площади обрушения (при отношении $\mu_{Ai} = const.$), константа K_1 возрастает.

Таблица 5 – Годовые значения константы K_1 для зданий класса СС3 для условий Республики Беларусь

A_{col}, м^2	N_F, чел	$n_F=N_F/A_{col}$, чел/м^2	Относительная стоимость конструкционных мер безопасности C_1/C_0		
			Малая (0.001)	Средняя (0.01)	Большая (0.1)
100	5	5.00E-02	3.51E-07	3.51E-06	3.51E-05
200	8	4.00E-02	4.38E-07	4.38E-06	4.38E-05
300	10	3.33E-02	5.26E-07	5.26E-06	5.26E-05
400	12	3.00E-02	5.84E-07	5.84E-06	5.84E-05
500	13	2.60E-02	6.74E-07	6.74E-06	6.74E-05
1000	20	2.00E-02	8.76E-07	8.76E-06	8.76E-05
2000	29	1.45E-02	1.21E-06	1.21E-05	1.21E-04
2500	33	1.32E-02	1.33E-06	1.33E-05	1.33E-04

Примечания:
1) потенциальное количество жертв N_F определено согласно [15] по формуле (8) при μ_{Ai} = 1/3 для класса СС3;
2) значения константы K_1 определены по формуле (9) при ω = 2%; $\overline{\gamma}_s$ = 8%;
3) стоимость возведения принята как среднее удельное значение C_0=1000 USD/м^2 – для общественных зданий.

При этом следует обратить внимание на одно важное, на наш взгляд, обстоятельство. В таблице 6 приведены для сравнения социально-экономические индикаторы, применяемые при расчёте значения константы K_1 для социально-экономических условий Республики Беларусь и Швейцарии (по данным [10]), население которой (9006640 чел. в 2023 году) близко к населению Республики Беларусь (9200000 чел. в 2023г.), но ВВП на душу населения отличается примерно в 10 раз.

Таблица 6 – Основные социально-экономические индикаторы, использованные при расчете K_1

Индикатор \ Страна	Беларусь	Швейцария [10]
g (USD/чел)	7020	79 671
ω	0,117	0,12
β	0,659	0,72
q	0,201	0,19
SWTP (USD×10^{-6})	1,15	5,7

На рисунке 5 показана зависимость константы K_1 от уровня тяжести последствий (выраженного в удельном числе жертв n_F, чел./м^2) для зданий класса СС2 (C_0 =1000 USD/м^2 – для условий РБ и C_0=2280 USD/м^2 – для условий Швейцарии) при различной относительной стоимости мер конструктивной безопасности (C_1 / C_0 =0.001; 0.01; 0.1). Несмотря на существенные различия в величине ВВП на душу населения (см. таблицу 6) и результирующее значение SWTP (1.05 млн. USD для РБ и 5.7 млн. USD – для Швейцарии), при фактических значениях стоимости 1 м^2 для определенной категории здания (C_0 =1000 USD/м^2 – для условий РБ и C_0=2280 USD/м^2 – для условий Швейцарии) при принятых ставках дисконтирования, значения константы K_1 (см. рисунок 5) практически не отличаются, что даёт примерно равные значения мер надёжности (вероятности отказа, рассчитанной по формуле (9)) для целого ряда стран Европы, включая Республику Беларусь. Отсюда, очевидно следует, что значение константы K_1, определяющей пороговое значение параметра принятия решения из условий безопасности жизнедеятельности можно принять равным для целой группы стран, включая Республику Беларусь.

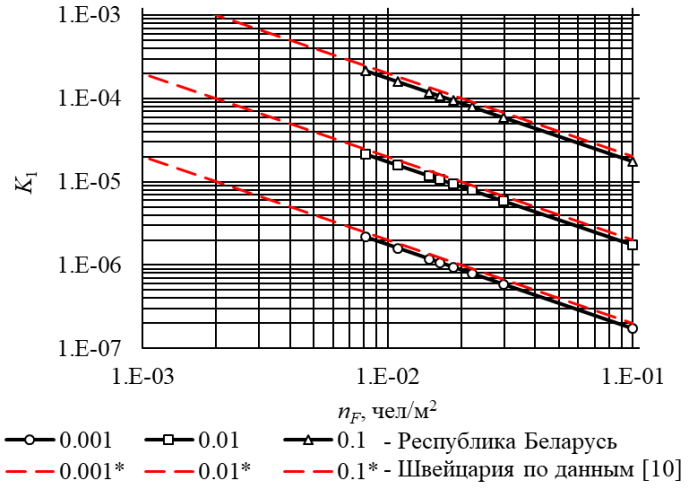

Рисунок 5 – График изменения константы K_1 в зависимости от последствий отказа (уд. числа жертв, чел/м²) при различных отношениях C_1/C_0

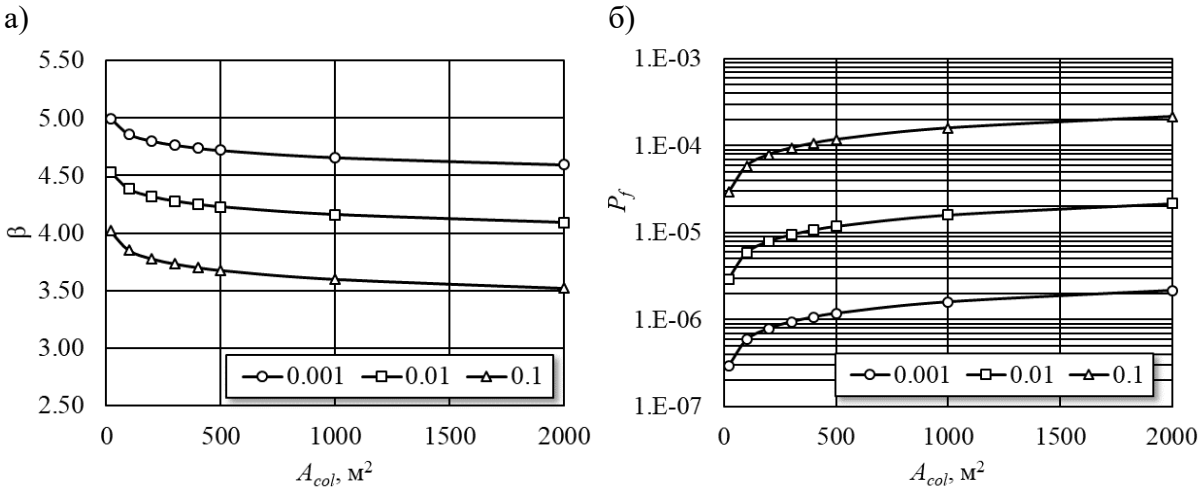

Рисунок 6 – Зависимость индекса надежности (а); вероятности отказа (б); от площади обрушения для конструктивных систем класса СС2

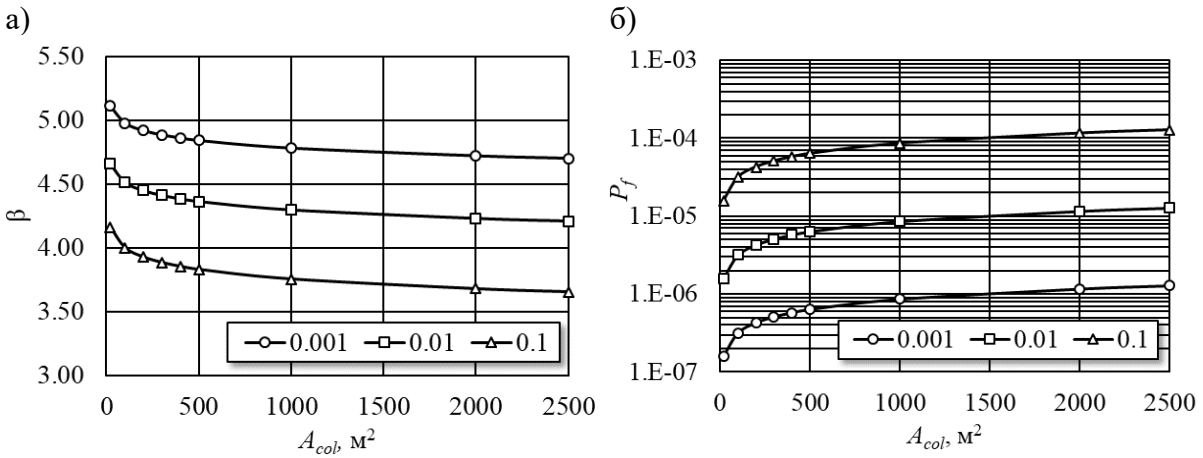

Рисунок 7 – Зависимость индекса надежности (а); вероятности отказа (б); от площади обрушения для конструктивных систем класса СС3

Как видно из полученных результатов (см. таблицы 7-8 и рисунки 6-7), показывающих как связаны между собой меры надёжности и последствия для различных категорий зданий, с увеличением прогнозируемой площади обрушения A_{col} (как индикатора последствий) минимальное целевое значение индекса надёжности $\beta_{tag,acc}$ снижается. Здесь проявляется влияние масштабного фактора, зависящего от размеров здания. Вместе с тем, если построить график, связывающий меры надёжности (целевую вероятность отказа и соответствующее значение индекса надёжности) и площади обрушения для конкретного здания с площадью-нетто (например, как показано на рисунке 8), то с увеличением площади обрушения (с ростом коэффициента распространения повреждения $D = A_{col}/A_{floor}$) значения целевых уровней надёжности возрастают, что соответствует принятой концепции надёжности.

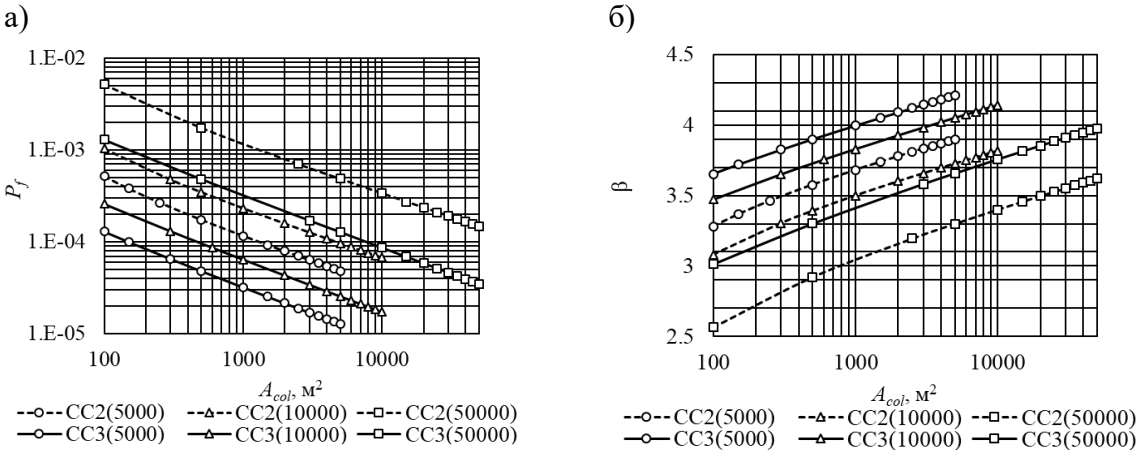

Рисунок 8 – Зависимость (а) допустимой вероятности отказа P_f и (б) индекса надежности β_{LQI} от площади обрушения для различных значений площади здания A_{floor}

Учитывая то обстоятельство, что минимальные значения целевых индексов надёжности $\beta_{tag,acc}$ изменяются ощутимо только при площадях $A_{col} \leq 100\text{м}^2$ (см. рисунки 6 и 7) было предложено для каждого класса последствий выделить три характерных участка, в пределах которых средневзвешенные значения индексов надёжности можно считать постоянными (при соответствующих значениях удельного числа жертв n_F: $n_F < 0.01$; $0.01 \leq n_F < 0.03$; $n_F \geq 0.03$). С учётом этого обстоятельства была составлена таблица 7, содержащая допустимые минимальные меры надёжности, определенные на основе LQI- критерия для условий Республики Беларусь и учитывающие рассчитанное удельное число жертв n_F (по аналогии с коэффициентом заполняемости μ_{Ai} в таблицах 2 и 3). Обращает на себя внимание более узкий диапазон ограничений, принятый в таблице 7 для реферативного периода 1 год.

Таблица 7 – Минимальные целевые значения индексов надежности и вероятностей отказа (реферативный период 1 год)

Класс	n_F	Относительная стоимость конструкционных мер безопасности C_1/C_0		
		0.001	0.01	0.1
CC2	$n_F \geq 0.03$	4.95 3.71E-07	4.48 3.73E-06	3.96 3.75E-05
	$0.01 \leq n_F < 0.03$	4.78 8.76E-07	4.28 9.34E-06	3.72 9.96E-05
	$n_F < 0.01$	4.64 1.74E-06	4.13 1.81E-05	3.56 1.85E-04
CC3	$n_F \geq 0.05$	5.06 2.10E-07	4.61 2.01E-06	4.10 2.07E-05
	$0.02 \leq n_F < 0.05$	4.90 4.79E-07	4.42 4.94E-06	3.88 5.22E-05
	$n_F < 0.02$	4.77 9.21E-07	4.28 9.34E-06	3.72 9.96E-05

Опираясь на сформулированные выше допущения, были получены целевые значения мер надёжности (вероятности отказа и индексы надёжности) для социально-экономических условий Республики Беларусь, приведенные в таблице 8, которые следует применять при проверках живучести конструктивных систем в особых расчётных ситуациях из условия безопасности жизнедеятельности.

Таблица 8 – Индексы надежности (вероятности отказа) при относительной стоимости конструкционных мер безопасности C_1/C_0 = 0,005 для социально-экономических условий РБ (из условия безопасности жизнедеятельности)

Класс	(n_F=N_F/A_{col}, чел/м^2)	Реферативный период	
		1 год	50 лет
CC2	$n_F \geq 0.03$	4.6 1.92E-06	3.7 9.59E-05
	$0.01 \leq n_F < 0.03$	4.4 4.50E-06	3.5 2.25E-04
	$n_F < 0.01$	4.3 8.93E-06	3.3 4.47E-04
CC3	$n_F \geq 0.05$	4.8 1.02E-06	3.89 5.09E-05
	$0.02 \leq n_F < 0.05$	4.6 2.44E-06	3.7 1.22E-04
	$n_F < 0.02$	4.4 4.71E-06	3.50 2.36E-04

Как видно из результатов калибровок, приведенных в таблице 8, целевые меры надёжности, полученные из условий обеспечения безопасности жизнедеятельности с использованием LQI –критерия, имеют значения, пониженные по сравнению со значениями, полученными на основе экономической оптимизации и внесенные в нормы СН 2.01.01[1] для нового проектирования. Это, с одной стороны, не противоречит подходу ISO 2394: 2015 [8], в рамках которого экономическую оптимизацию выполняют исключительно в области допустимых значений, расположенной левее граничных целевых мер надёжности, полученных из условия обеспечения безопасности жизнедеятельности (см.рисунок 1), а с другой – позволяет получить дополнительные экономические преимущества, связанные с рациональным проектированием защитных мер для предотвращения непропорционального обрушения.

Графики, показанные на рисунках 9-10 в общем случае являются эквивалентами диаграмм ALARP, связанных с оцениванием целевых мер надёжности $\beta_{tag|acc}$ исходя из обеспечения безопасности жизнедеятельности. По горизонт альной оси традиционно отложено прогнозируемое количество жертв в абсолютном (N_F) или относительном (n_F) выражении, а по вертикальной- частота появления отказа с числом жертв ($N \geq N_F$).

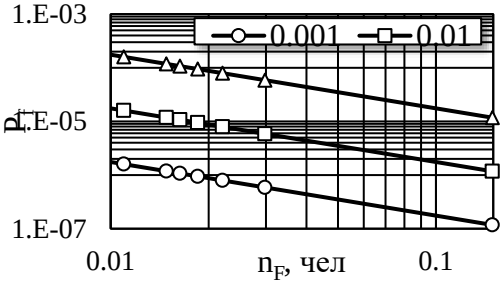

Рисунок 9 – График «P_f-n_F» для класса CC2

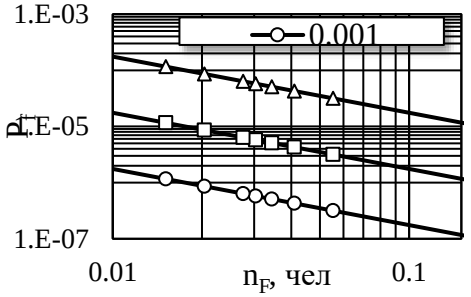

Рисунок 10 – График «P_f-n_F» для класса CC3

Как видно из графиков, приведенных на рисунках 9 и 10 индивидуальные риски, определенные из условий обеспечения безопасности жизнедеятельности с использованием LQI-критерия изменяются в зависимости от стоимости мер конструктивной безопасности в пределах от 2×10^{-5} до 3.4×10^{-6}.

Следует отметить, что результаты расчётов, представленные в таблице 8, хорошо совпадают с данными, приведенными в таблице 2. Это обусловлено тем обстоятельством, что в обеих случаях принималось допущение о том, что все потенциальные жертвы, определенные по модели последствий с учётом коэффициента заполняемости, находятся в пределах площади обрушения (при D=1 как предельный случай). Как было доказано в работах [10, 11] при переходе к классу СС3 от класса СС2 целевые значения индексов надёжности, полученные с следует увеличивать на $\Delta\beta_{LQI}$=0.5, что подтверждают графики, показанные на рисунках 11 и 12.

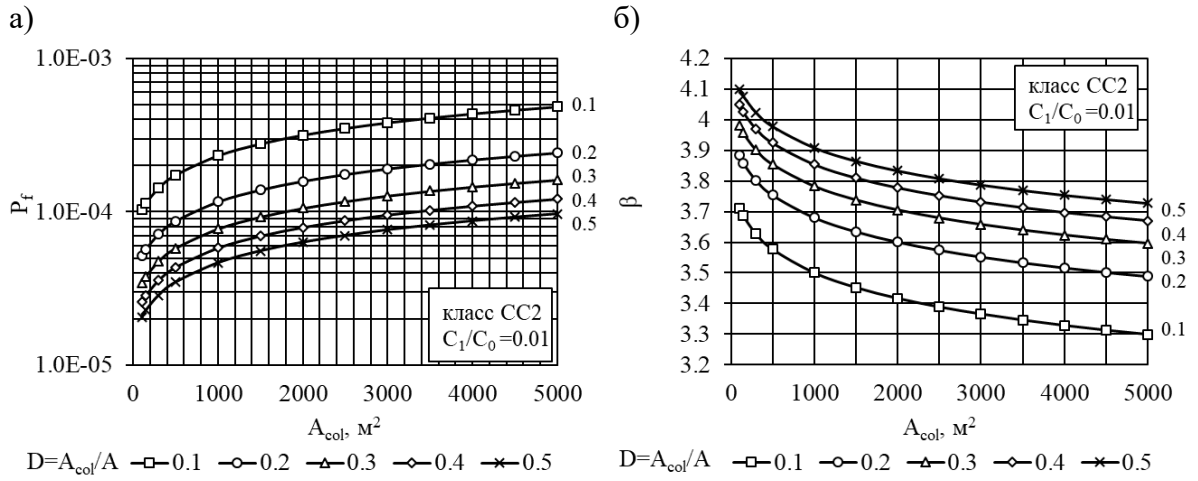

Рисунок 11 – Зависимость (а) допустимой вероятности отказа P_f и (б) индекса надежности β_{LQI} от площади обрушения для различных значений коэффициентов $D=A_{col}/A_{floor}$ для класса последствий CC2

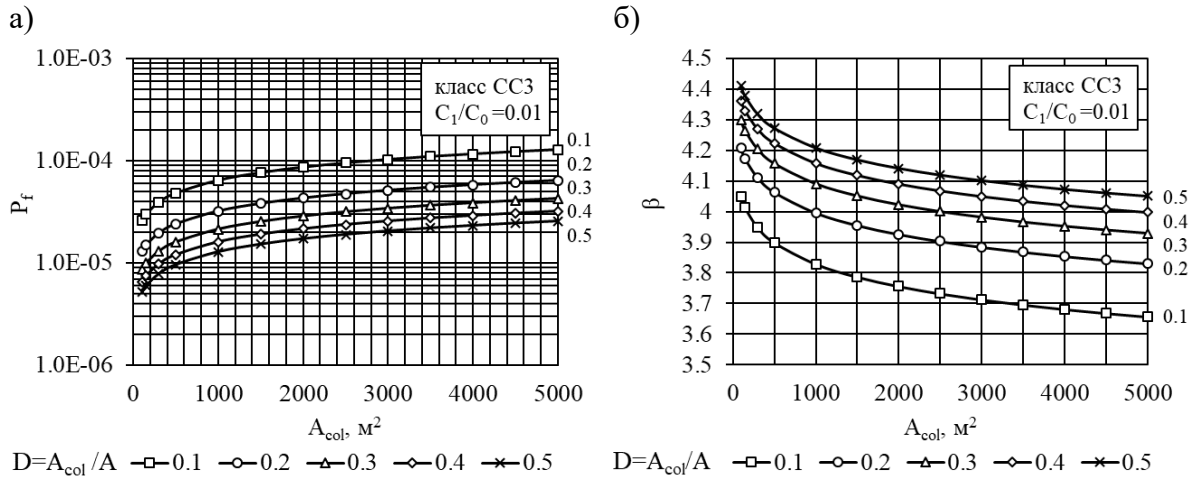

Рисунок 12 – Зависимость (а) допустимой вероятности отказа P_f и (б) индекса надежности β_{LQI} от площади обрушения для различных значений коэффициентов $D=A_{col}/A_{floor}$ для класса последствий CC3

Калибровка глобального коэффициента безопасности

При установленных значениях целевых мер надёжности, основанных на LQI- критерии для соответствующих классов последствий (СС), становиться возможным определить условные вероятности отказа модифицированной (поврежденной) конструктивной системы, применяемые при статистических калибровках глобальных коэффициентов безопасности, используемых как мера надёжности при выполнении нелинейных расчётов. В общем случае,

опираясь на минимальное/пороговое значение вероятности отказа конструктивной системы $P_{ftag,acc}(C)$, установленное на основе LQI- критерия, и принимая во внимание, что условная вероятность $P(D|H) = 1$, условную вероятность отказа поврежденной системы $P(C|D)$, определяют по формуле:

$$P(C|D) = \frac{P_{ftag,acc}(C)}{\lambda} \quad (13)$$

где λ – годовая частота появления угрозы (особого события).

При установленном значении условной вероятности отказа $P(C|D)$ калибруют значение глобального коэффициента безопасности, применяемого при проверках живучести поврежденной конструктивной системы, применяя методику [16]. Полученные значения консервативны т.к. не учитывают условную вероятность отказа ключевого элемента (сразу реализуется стратегия ALP при $P(D|H) = 1$).

Выводы

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. При проверках живучести конструктивных систем в особых расчётных ситуациях следует применять *минимально* допустимые меры надёжности, в качестве которых приняты пороговые/граничные значения вероятностей отказа и соответствующих индексов надёжности, полученные на основе базового требования обеспечения безопасности жизнедеятельности. Данный подход реализован с использованием LQI-критерия, при вычислении константы относительных затрат на спасение жизни К, для социально-экономических условий Республики Беларусь. Пороговые значения параметров принятия решения p_{acc} , полученные из условий обеспечения безопасности жизнедеятельности, определяют границу области, в которой следует выполнять экономическую оптимизацию мер надёжности.

2. Установлены целевые значения параметров надёжности, применяемые при проверках живучести в особых расчётных ситуациях, для социально-экономических условий Республики Беларусь, что позволяет обоснованно выполнить калибровку глобального коэффициента безопасности при выполнении нелинейного анализа поврежденных конструктивных систем. Из сравнения основных индикаторов социально-экономического развития, содержащихся в [24], можно заключить, что полученные меры надёжности применимы, с незначительными корректировками, и к условиям Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СН 2.01.01-2019. Основы проектирования строительных конструкций – Введ. 08.09.20. – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 83 с.

2. Тур, В. В. О назначении требуемых мер надежности при разработке национальных нормативных документов по проектированию строительных конструкций / В. В. Тур, А. В. Тур, С. С. Дереченник, Вестник Брестского государственного технического университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2020. – № 1. – С. 2–15.

3. Шпёте Г. Надёжность несущих строительных конструкций/Пер.с.нем.О.О. Андреева. М: Стройиздат, 1994. – 288 с.: ил.

4. ***fib*** Model Code for Concrete Structures2020. Final Draft -May 2023: Federal Institute of Technology, Lausanne-EPEL, 2023-843 p.p.

5. Основы проектирования конструкций. Еврокод: ТКП EN 1990-2011. – Введ. 01.07.12. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2012. – 70 с.

6. Проектирование железобетонных конструкций. Еврокод 2. ТКП-EN 1992-1-1-2009.- Введ.01.07.2010. -Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2010. – 207 с.

7. prEN 1990 Basis of Structural and Geotechnical Design- CEN, 2020-476 p.p.

8. Надежность строительных конструкций. Общие принципы: СТБ ISO 2394-2015. – Введ. 01.01.2016. – Минск: Госстандарт, 2016. – 69 с

9. JCSS Probabilistic Model Code // Joint Committee of Structural Safety [Electronic resource]. –2001. –Mode of access: http://www.jcss.ethz.ch. –Date of access: 15.01.2016

10. Fisher K., Bernardo-Viljoen., Faber M. Deriving target reliabilities from LQI: LQI-Symposium in Kgs. Lyngby, Denmark, aug.21-21, 2012.-234 p.p.

11. On the assessment of marginal life saving costs for risk acceptance criteria [Electronic resource] / Katharina Fischer, Edgar Virguez, Mauricio Sanches-Silva, Michael H. Faber // Structural Safety. –2013. – Journal homepage. – Mode of access: http:// www.elsevier.com/locate/strusafe. – Data of access: 27.08.2020.

12. R. Rackwitz. Optimization and risk acceptability based on the life quality index. Structural Safety, 24(2-4):297–332, 2002.

13. Rackwitz, R. (2008). The philosophy behind the Life Quality Index and empirical verifications. JCSS Basic Documents on Risk Assessment in Engineering, www.jcss.byg.dtu.dk.

14. Лапина А.И. Определение оптимальных значений целевых индексов надёжности строительных конструкций для плоских перекрытий каркасных зданий// Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство. - 2019.-№3-С.13-19/ doi.org./10.36773/1818-1212-2021-125-2-13-19.

15. Hingorani R. Acceptable life safety risk associated with the effects of gas explosions on reinforced concrete structures. /Thesis Doctoral, Madrid, UPM,2017.-329 p.p.

16. Тур, В. В. Формат безопасности при выполнении нелинейных расчетов железобетонных конструкций / В. В. Тур, А. В. Тур // Теория и практика исследований и проектирования в строительстве с применением систем автоматизированного проектирования (САПР), сборник статей Международной научно-технической конференции, Брест, март 2017 года / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет; редкол.: С. М. Семенюк [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2017. – С. 243-260.

17. Демографический ежегодник Республики Беларусь: статистический сборник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь; редкол: И. В. Медведева [и др.]. – Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2019. – 442 с.

18. Демографический ежегодник Республики Беларусь: статистический сборник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь; редкол.: И. В. Медведева [и др.]. – Минск : Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2021. – 440 с.

19. Демографический ежегодник Республики Беларусь: статистический сборник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь; редкол.: И. В. Медведева [и др.]. – Минск : Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2022. – 431 с.

20. Демографический ежегодник Республики Беларусь: статистический сборник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь; редкол.: И. В. Медведева [и др.]. – Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2023. – 429 с.

21. Беларусь в цифрах: статистический справочник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь; редкол.: И. В. Медведева [и др.]. – Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2019. – 72 с.

22. Беларусь в цифрах: статистический справочник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь; редкол.: И. В. Медведева [и др.]. – Минск: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2020. – 72 с.

23. Беларусь – валовой внутренний продукт [Электронный ресурс] / / Мировой атлас данных. Беларусь. Экономика. – Режим доступа: https://knoema.ru/atlas/Беларусь/ВВП. – Дата доступ: 02.09.2019.

24. Беларусь и Россия 2022: Стат.сб./Росстат, Белстат, -Б43М., Росстат, 2022- 206 с.

REFERENCES

1. SN 2.01.01-2019. Osnovy proektirovaniya stroitel'nyh konstrukcij [Basics of design of building structures], Minsk, 2020 – 83 p.p. (In Russian)

2. Tur, V. V. O naznachenii trebuemyh mer nadezhnosti pri razrabotke nacional'nyh norma-tivnyh dokumentov po proektirovaniyu stroitel'nyh konstrukcij [On the appointment of required reliability measures in the development of national regulatory documents on the design of building structures] / V.V. Tur, A.V. Tur, S.S. Derechennik, Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura [Bulletin of the Brest State Technical University. Series: Construction and Architecture]. – 2020. – № 1. – S. 2–15. (In Russian)

3. SHpyote G. Nadyozhnost' nesushchih stroitel'nyh konstrukcij [Reliability of load-bearing building structures]/Per.s.nem.O.O. Andreeva. M: Strojizdat, 1994. – 288 p.p.

4. ***fib*** Model Code for Concrete Structures2020. Final Draft -May 2023: Federal Institute of Technology, Lausanne-EPEL, 2023-843 p.p.

5. TKP EN 1990-2011. Osnovy proektirovaniya konstrukcij [Basics of design of building structures]. – Minsk: M-vo arhitektury i str-va Resp. Belarus', 2012. – 70 p.p. (In Russian)

6. TKP-EN 1992-1-1-2009. Proektirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij [Design of reinforced concrete structures]. - Minsk: M-vo arhi-tektury i str-va Resp. Belarus', 2010. – 207 p.p. (In Russian)

7. prEN 1990 Basis of Structural and Geotechnical Design- CEN, 2020-476 p.p.

8. STB ISO 2394-2015. Nadezhnost' stroitel'nyh konstrukcij. Obshchie principy [Reliability of building structures. General principles]. – Minsk: Gosstandart, 2016. – 69 p.p. (In Russian)
9. JCSS Probabilistic Model Code // Joint Committee of Structural Safety [Electronic resource]. –2001. – Mode of access: http://www.jcss.ethz.ch. –Date of access: 15.01.2016
10. Fisher K., Bernardo-Viljoen., Faber M. Deriving target reliabilities from LQI: LQI-Symposium in Kgs. Lyngby, Denmark, aug.21-21, 2012.-234 p.p.
11. On the assessment of marginal life saving costs for risk acceptance criteria [Electronic resource] / Katharina Fischer, Edgar Virguez, Mauricio Sanches-Silva, Michael H. Faber // Structural Safety. –2013. – Journal homepage. – Mode of access: http:// www.elsevier.com/locate/strusafe. – Data of access: 27.08.2020.
12. R. Rackwitz. Optimization and risk acceptability based on the life quality index. Structural Safety, 24(2-4):297–332, 2002.
13. Rackwitz, R. (2008). The philosophy behind the Life Quality Index and empirical verifications. JCSS Basic Documents on Risk Assessment in Engineering, www.jcss.byg.dtu.dk.
14. Lapina A.I. Opredelenie optimal'nyh znachenij celevyh indeksov nadyozhnosti stroitel'nyh konstrukcij dlya ploskih perekrytij karkasnyh zdanij [Determination of optimal values of target indexes of reliability of building structures for flat floors of frame buildings] // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo [Bulletin of the Brest State Technical University. Construction]. - 2019.-№3 - p.13-19 / doi.org./10.36773/1818-1212-2021-125-2-13-19.
15. Hingorani R. Acceptable life safety risk associated with the effects of gas explosions on reinforced concrete structures. /Thesis Doctoral, Madrid, UPM,2017.-329 p.p.
16. Tur, V. V. Format bezopasnosti pri vypolnenii nelinejnyh raschetov zhelezobetonnyh konstrukcij [Safety format for performing nonlinear calculations of reinforced concrete structures] / V.V. Tur, A.V. Tur // Teoriya i praktika issledovanij i proektirovaniya v stroitel'stve s primeneniem sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya (SAPR), sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii, Brest, mart 2017 goda / Ministerstvo obrazovaniya Respubliki Belarus', Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet; redkol. [Theory and practice of research and design in construction using computer-aided design (CAD) systems, collection of articles of the International Scientific and Technical Conference, Brest, March 2017 / Ministry of Education of the Republic of Belarus, Brest State Technical University]: S. M. Semenyuk [i dr.]. – Brest : BrGTU, 2017. – P. 243-260.
17. Demographic Yearbook of the Republic of Belarus: statistical collection / National Statistical Committee of the Republic of Belarus; editorial board: I. V. Medvedeva [et al.]. – Minsk: National Statistical Committee of the Republic of Belarus, 2019. – 442 p.
18. Demographic Yearbook of the Republic of Belarus: statistical collection / National Statistical Committee of the Republic of Belarus; editor: I. V. Medvedeva [et al.]. – Minsk : National Statistical Committee of the Republic of Belarus, 2021. – 440 p.
19. Demographic Yearbook of the Republic of Belarus: statistical collection / National Statistical Committee of the Republic of Belarus; editor: I. V. Medvedeva [et al.]. – Minsk : National Statistical Committee of the Republic of Belarus, 2022. - 431 p.
20. Demographic Yearbook of the Republic of Belarus: statistical collection / National Statistical Committee of the Republic of Belarus; editor: I. V. Medvedeva [et al.]. – Minsk: National Statistical Committee of the Republic of Belarus, 2023. – 429 p.
21. Belarus in numbers: statistical handbook / National Statistical Committee of the Republic of Belarus; editor: I. V. Medvedeva [et al.]. – Minsk: National Statistical Committee of the Republic of Belarus, 2019. – 72 p.
22. Belarus in numbers: statistical handbook / National Statistical Committee of the Republic of Belarus; editor: I. V. Medvedeva [et al.]. – Minsk: National Statistical Committee of the Republic of Belarus, 2020. – 72 p.
23. Belarus – gross domestic product [Electronic resource] / World Data Atlas. Belarus. Economy. – Access mode: https://knoema.ru/atlas/Беларусь/ВВП . – Date of access: 02.09.2019.
24. Belarus and Russia 2022: Stat.sat./Rosstat, Belstat, -B43M., Rosstat, 2022- 206 p.

Информация об авторах:

Тур Андрей Викторович
УО «Брестский государственный технический университет», г. Брест, Беларусь, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой архитектуры.
E-mail: aturphd@gmail.com

Information about authors:

Tur Andrei V.
Brest State Technical University, Brest, Belarus, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Architecture.
E-mail: aturphd@gmail.com