

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ РИСКА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ КОМБИНИРОВАННЫХ ОСОБЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

SCIENTIFIC BASIS OF RISK ASSESSMENT AND SECURITY OF REINFORCED CONCRETE CONSTRUCTERS, BUILDINGS AND STRUCTURES UNDER COMBINED SPECIAL IMPACTS

А.Г. ТАМРАЗЯН, д-р техн. наук, проф.

Рассматриваются вопросы, связанные с развитием концептуальных подходов к определению допустимого уровня риска зданий и сооружений. Представлены экспериментально-теоретические исследования прочностных и деформативных характеристик железобетонных конструкций при различных температурах с учетом скорости динамического нагружения. Рассмотрены особенности расчета зданий и сооружений на прогрессирующее разрушение во всем диапазоне сочетаний силового и температурного нагружений.

The following questions are considered in the article: development of conceptual approaches to determining the permissible level of risk for buildings and structures; experimental & theoretical studies of the strength and deformation characteristics of reinforced concrete structures at various temperatures, taking into account the rate of dynamic loading; development of the theory of calculating buildings and structures for progressive destruction in the entire range of combinations of force and temperature loads.

Ключевые слова:

метод предельных состояний, надежность, риск-ущерб, целевая функция, динамический эффект, огневые воздействия, огнеударостойкость, принципы анализа риска

Key words:

method of limiting states, reliability, risk-damage, objective function, dynamic effect, fire effects, fire-shock resistance, principles of risk analysis

Вопросы, касающиеся метода расчета железобетонных конструкций по предельным состояниям, напрямую относятся к проблемам обеспечения безопасности и надежности, а значит, имеют и социальное значение. Несомненно, в ряду тех, кто это разрабатывал и внедрял в расчетную и нормативную практику, - А.Ф. Лолейт, А.А. Гвоздев, П.Л. Пастернак и многие другие выдающиеся ученые.

На протяжении последних десяти лет в НИУ МГСУ на кафедре железобетонных и каменных конструкций интенсивно проводятся исследования, связанные с различными сочетаниями различного характера нагрузок и воздействий, которые стали нередки при проектировании и эксплуатации зданий в последнее время.

Это в первую очередь различные сочетания динамических воздействий в условиях высоких температур (пожара), которые возникают при взрыве, предполагающие возможность мгновенного выхода из строя одного вертикального несущего элемента, принятого в различных СП. Но в используемых расчетных комплексах и в нормативных документах не учитывается тот очевидный факт, что при взрыве возникает пожар, а при пожаре происходит взрыв. Известный пример – разрушения Нью-Йоркских башен-близнецов в 2011 г., споры о причинах которых продолжаются до сих пор.

Не менее частый случай – землетрясение с последующим пожаром. Как запроектировать и оценить остаточный ресурс таких зданий? В нормах по сейсмостойкому проектированию об этом нет рекомендаций. В различных пособиях даются оценки технического состояния зданий, железобетонных конструкций после огневого воздействия, но только для работы и эксплуатации в статической постановке.

Другой случай. Та же оценка сейсмостойкости железобетонных зданий, получивших определенные виды ущерба, дефекты силового и несилового характера. Речь идет о коррозионных повреждениях и их влиянии на несущую способность при ударных, динамических воздействиях, а также при пожаре. Подобные воздействия, следуя логике случайных процессов, с наибольшей вероятностью возникают не в начальный период эксплуатации, а через некоторое время, по сложной экспоненте и пуассоновскому распределению. А это уже стадия эксплуатации, где вероятнее всего и начинают происходить деградиационные процессы. Все это проявляется в итоговой оценке надежности, обеспечении безопасности и долговечности конструкций, зданий и сооружений.

Альтернативой численным методам анализа, а точнее, в части их безусловного усиления являются структурные, а не феноменологические теории расчета, заложенные во всех расчетных программах. В этом направлении относительно мало исследований как зарубежных, так и отечественных. Одна из первых таких работ, посвященных разработке моделей расчета железобетонных конструкций на основе структурной теории, была проведена на кафедре железобетонных конструкций 20 лет тому назад.

В [1] надежность определяется как вероятность ненаступления предельного состояния, т. е. вероятность безотказной работы. Но не более. С другой стороны, надёжность интерпретируется также как «безопасность минус риск». Теория риска решает задачи, возникающие после достижения предельных состояний. Это учет вероятности реализации последствий определенного уровня. Такую теорию можно рассматривать как логичный шаг в развитии методов расчета по предельным состояниям, который может от полувероятностного метода перейти к вероятностному. Для этого уже имеются достаточно мощные вычислительные комплексы, математический аппарат, программное обеспечение, чтобы без затратных экспериментов определить все составляющие вероятного распределения случайных процессов. Наиболее точно зависимость риск-ущерб ($R - S$) аппроксимируется экспоненциальной кривой. При этом получены зависимости, определяемые степенью обрушения (рис. 1).

Обрушение 1-й степени ($100 \text{ м}^2 \leq S \leq 240 \text{ м}^2$) описывается экспонентой с коэффициентом корреляции 0,973:

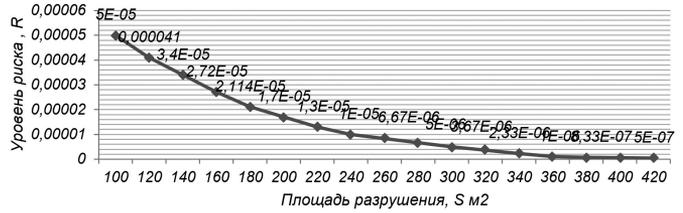


Рис.1. Зависимость уровня риска от площади разрушения

$$R = 0,00025 \cdot e^{(-0,01 \times S)} \tag{1}$$

Обрушение 2-й степени ($240 \text{ м}^2 \leq S \leq 360 \text{ м}^2$):

$$R = 0,00015 \cdot e^{(-0,01 \times S)} \tag{2}$$

Обрушение 3-й степени ($\geq 360 \text{ м}^2$):

$$R = 0,000038 \cdot e^{(-0,01 \times S)} \tag{3}$$

На основании этого формируется группа оптимизации, определяющая характеристики конструкции с учетом риска отказа. Оптимизация проводится с привлечением экономического анализа безопасности, основанного на учете затрат на ее обеспечение и потерь от возможных аварий. Это позволит заметно повысить качество проектирования и уровень безопасности объектов [2].

Обобщенная целевая функция, учитывающая себестоимость конструкции (в данном случае — монолитной плиты перекрытия), эксплуатационные затраты и риски, зависящие от категории ответственности здания, определяется как [3]

$$\Phi_3 = \left[C_1 V_b + C_2 V_b^2 + \sum_r (C_3 V_s + C_4 V_s^2) + \sum_i C_{\text{ДОП}} + (1 - P) \cdot C_{\text{ЭКС}} + R(t) \right] \tag{4}$$

где $C_{\text{ЭКС}}$ — эксплуатационные затраты.

$C_1 = C_a + C_{\text{ОЗП}} + C_{\text{ЭМ}}$ — производственная себестоимость 1 м³ бетона «в деле»;

C_b — сметная стоимость 1 м³ бетонной смеси;

$C_{\text{ОЗП}}$ — общая заработная плата рабочих;

$C_{\text{ЭМ}}$ — стоимость эксплуатации машин, включающая себестоимость аренды и стоимость израсходованной электроэнергии машины или дизельного топлива;

$C_3 = C_a + C_{\text{ОЗП}} + C_{\text{ЭМ}}$ — производственная себестоимость 1 т арматуры «в деле»;

C_2, C_4 — производственные себестоимости 1 м³ бетона и 1 т арматуры, принимаемые в зависимости от расхода;

$V_b = \omega_0 h_0 = \omega_{\sigma} x_1$ — объем бетонной смеси k-го участка пластины;

$V_{s,r} = \omega_0 h_k (\mu_1 + \mu_2) = \omega_{\sigma} x_1 (x_2 + x_3)$ — объем арматуры данного вида k-го участка пластины;

k_3 — коэффициент зимних удорожаний;

k_c — коэффициент зимних удорожаний;

$\sum_i C_{\text{ДОП}} = \Delta \Phi_s(\alpha) + \Delta \Phi(z)$ — дополнительные затраты;

$\Delta \Phi_s(\alpha)$ — затраты на изготовление каркасов и закладных деталей;

$\Delta \Phi(z)$ — затраты, учитывающие обрыв и размещение арматурных сеток, расход арматуры на обрамление технологических отверстий, перехлест и анкеровку;

$R(t)$ — риск отказа.

Разрез по поверхностям решений даст условные границы допустимой области (рис. 2), т.е. условные линии, на которых располагаются допустимые конструктивные решения для каждого вида

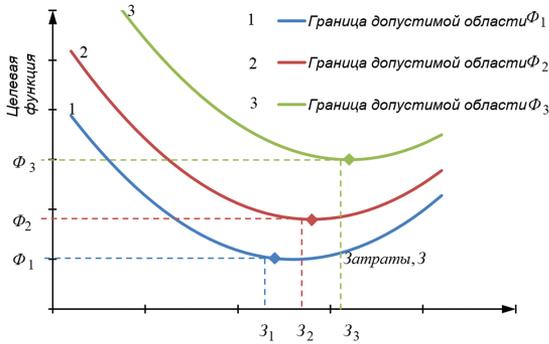


Рис. 2. Области оптимальных решений плиты в зависимости от вида целевой функции

решений позволяют минимизировать эти затраты.

Исходя из этого, выдвигается следующий тезис конструирования: каждая конструкция отвечает сама за себя, но все вместе они обеспечивают безопасность здания.

Разработанный метод количественной оценки риска позволяет решать не только задачи по определению риска аварии и связанные с ней ожидаемые материальные потери, но и задачу оптимального распределения затрат на проектирование конструкций при проектных и запроектных воздействиях и минимизации отказов, непропорциональных этим воздействиям.

При расчете на прогрессирующее разрушение возникающий динамический эффект принято учитывать коэффициентом, большим единицы, в диапазоне $\kappa_d = 1, 2 \dots 1,4$ в зависимости от этажности здания. При расчете высотных зданий нами проведены экспериментально-теоретические исследования по определению коэффициента динамичности.

Здесь большой вклад внесли профессора Н.Н. Попов, Б.С. Расторгуев, А.В. Забегаев, В.О. Алмазов, В.И. Жарницкий и др.

Однако во всех этих исследованиях не рассмотрено влияние температуры, которое ограничивалось и сейчас также ограничивается только определением огнестойкости.

Исследования показали, что в определенных температурных пределах (400-900 °С) в зависимости от скорости нагружения (0,1-0,07 с) коэффициент динамичности может колебаться от 0,6 до 0,8 (рис. 3)[4].

В работе [5] получена корреляционная зависимость κ_d от температуры для железобетонной балки: – при времени нагружения 0,07 с

$$K_d = 1,2014 - 8,807 \cdot 10^{-9} t^2 - 0,000067t; \tag{5}$$

– при времени нагружения 0,1 с

$$K_d = 1,18 - 8,19 \cdot 10^{-9} t^2 - 0,000093t. \tag{6}$$

Это свидетельствует о том, что в расчетных комплексах, где не учитываются свойства бетона и железобетона резко менять свои значения при высокой температуре, заложены неправомерные запасы стойкости к прогрессирующему разрушению. Стойкость зданий к запроектным нагрузкам в этом случае оказывается завышенной более чем в 2 раза!

целевой функции, отличающиеся уровнем затрат, требующихся для достижения оптимума. Как видно из рис. 2, условное оптимальное значение для целевой функции Φ_1 достигается при уровне затрат Z_1 , тот же уровень оптимальности для функции Φ_2 достигается при уровне затрат $Z_2 > Z_1$. Аналогично для функции Φ_3 уровень затрат $Z_3 > Z_2 > Z_1$.

Конструкционная безопасность может быть обеспечена при различных уровнях материальных затрат. Правильная структура целевой функции и методика поиска оптимальных

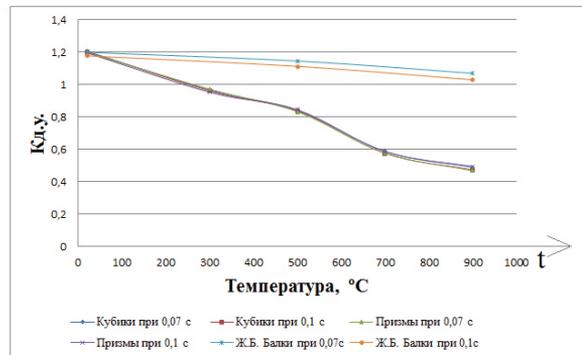


Рис. 3. График зависимости коэффициента динамического упрочнения бетонных кубиков, призм и железобетонных балок от огневых воздействий

Динамический расчет с использованием разработанной методики позволяет построить кривую снижения статической и динамической прочности элемента при температурах до $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4).

Из графика видно, что при нормативной нагрузке $N_{действ.} = 71\text{ кН}$ в температурном интервале от $T=20\dots 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ статическая прочность колонны обеспечена, а динамическая прочность при температуре пожара $T=900\text{ }^{\circ}\text{C}$ получается меньше действующей внешней нормативной нагрузки $N_{дин.разр.} = 63,15\text{ кН} < N_{действ.} = 71\text{ кН}$, что свидетельствует о разрушении и потере несущей способности элемента. Потеря несущей способности железобетонной колонны происходит при температуре стандартного пожара $T=805\text{ }^{\circ}\text{C}$

Определенный интерес представляет задача определения температуры, при которой коэффициент динамичности по материалу будет равен статическому коэффициенту редукции при пожаре $K_{dt} = \gamma_T$. Этот момент является исходной точкой развития опасной зоны работы колонны при динамическом нагружении. Для расчетного примера это происходит при температуре $468,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 4).

Расчеты огнестойкости конструкции при динамическом нагружении показывают, что важно знать начало приложения динамической нагрузки по графику стандартного или реального температурного режима (рис. 5, а). Понятно, что чем позже будет приложена одна и та же динамическая нагрузка, тем несущая способность колонны будет меньше. Или же при меньшей динамической нагрузке произойдет потеря несущей способности у этих колонн. В итоге такой сценарий приводит к эквивалентности динамической и статической нагрузок.

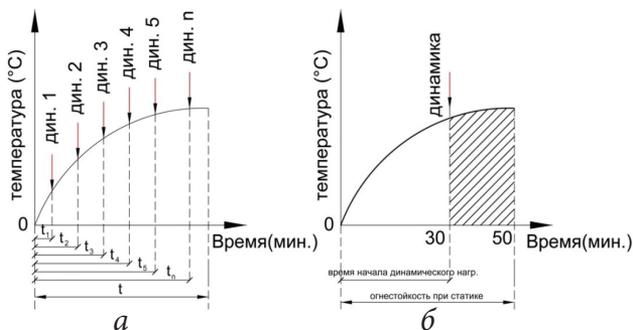


Рис. 5. Варианты динамического нагружения элементов при пожаре: а — схематичное приложение динамической нагрузки; б — огнестойкость колонны при разных типах нагружений

Проведенный по разработанной методике нелинейный динамический расчет колонны при времени стандартного пожара 30 мин показывает, что сжатый железобетонный элемент перестает удовлетворять требуемому пределу огнестойкости. На рис. 5, б штриховкой отмечена опасная зона, показывающая пределы сокращения огнестойкости колонны при динамическом нагружении.

Поэтому актуализация расчетных процедур, введение в конечные элементы свойства не твердого

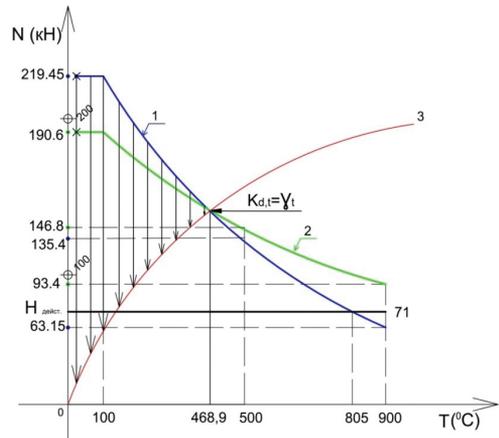


Рис. 4. График прочности железобетонной колонны при стандартном температурном режиме: 1 — динамической; 2 — статической; 3 — кривая температуры пожара по ISO 834

деформируемого тела, а именно железобетона, с его до конца еще не изученными свойствами во всем диапазоне физической, геометрической, конструктивной нелинейности на основе структурной теории деформирования позволит гарантировать надёжность результатов компьютерного моделирования и расчета.

Концепция взрывоогнеударостойкости конструкций, зданий и сооружений должна базироваться на общей модели возникновения и развития комбинированных особых воздействий, которая будет включать несколько подчиненных моделей, логически связанных между собой [6,7].

При решении подобных задач необходимо учитывать специфику мер, обеспечивающих огнестойкость конструкций. В условиях комбинированного воздействия пожара и взрыва эти меры могут противоречить друг другу. Например, для ослабления действия взрыва требуется устройство легко сбрасываемых конструкций, а для предупреждения развития пожара, наоборот, в ряде случаев необходимо ограничивать образование проемов в помещении. Те же противоречия возникают при обеспечении пожаробезопасности в сейсмостойких зданиях.

Понятие «безопасность» определяет государственная система, работающая с приемлемым уровнем риска. Риском управляют в соответствии с мерами по обеспечению безопасности.

Адекватная политика управления риском должна быть основана на согласии в обществе и делится, по крайней мере, на три критерия:

- приемлемый уровень индивидуального риска;
- приемлемый уровень коллективного риска;
- стоимость, связанная с определенными спасательными мерами по обеспечению безопасности.

Эмпирические распределения воздействий и ущербов при различных ЧС природного характера описываются несколькими типами распределений: нормальным (Гауссовским) законом, логнормальным, экспоненциальным и степенным распределением. Например, статистический анализ природного риска показал, что размещение опасности μ на территории имеет вид пуассоновских ансамблей с функцией вероятностей вида

$$P(S) = \mu^k/k! \cdot \exp(-\mu). \quad (7)$$

Параметром этого распределения является математическое ожидание μ рисков на единицу площади.

На основе анализа риска выбираются рациональные меры защиты, которые должны основываться на использовании следующих принципов [8, 9]:

1. Принцип оправданности практической деятельности

Любая деятельность, если польза от нее для общества не превышает ущерб от связанного с ней риска, не может быть оправдана. Польза для общества от какой-либо деятельности не всегда может совпадать с пользой для отдельной личности, поэтому данный принцип должен быть дополнен следующими условиями:

- деятельность, при которой тот или иной индивидуум подвергается чрезмерному риску, не может быть оправдана, даже если эта деятельность выгодна для общества в целом;
- члены общества добровольно соглашаются на наличие в их жизни определенного риска от той или иной деятельности, не превышающего допустимый уровень, и находящегося в пределах традиционных изменений ущерба и выгод от этой деятельности;
- затраты на защиту каждой личности от чрезмерного риска (денежные компенсации, перемещение населения и т.п.) должны включаться в общую сумму затрат на данный проект и вид деятельности и учитываться при оценке полезности этого проекта или вида деятельности для общества в целом.

2. Принцип оптимизации защиты

Использование лишь принципа обоснования не обеспечивает минимальный уровень риска. Рациональный объем мер (целевая функция безопасности) определяется из условия максимума отно-

шения предотвращенного ущерба к затратам на осуществление мер защиты

$$F_{\max} = \Delta M[W, \Delta t, v] / C(v), \quad (8)$$

где $\Delta M[W, \Delta t, v] = WQ(\Delta t) - W'(v) Q_{\text{чс}}(\Delta t v)$ – математическое ожидание предотвращенного благодаря приятным мерам защиты ущерба; C – затраты на реализацию мер защиты.

3. Принцип обстоятельности

Управление риском будет эффективным и последовательным, если включен весь совокупный спектр существующих в обществе опасностей и общий риск от них для любого человека и общества в целом не превышает допустимый уровень.

4. Принцип обоснования:

$$W'Q_{\text{чс}}(\Delta t) + C < WQ_{\text{чс}}(\Delta t) \text{ или } \Delta M[W, \Delta t] - C > 0. \quad (9)$$

Отсюда при известных значениях ущерба правило принятия решения можно записать в виде

$$Q_{\text{чс}}(\Delta t) > Q_{\text{чс}}^o(\Delta t), \quad (10)$$

где $Q_{\text{чс}}^o(\Delta t) = \frac{C}{\Delta W} - (\frac{W}{\Delta W} + 1) \Delta Q_{\text{чс}}$ – критериальное значение для правила принятия решения (минимально допустимая вероятность стихийного бедствия или аварийного воздействия);

$\Delta W = W - W'$, $\Delta Q_{\text{чс}} = \Delta Q_{\text{чс}}(\Delta t) - Q_{\text{чс}}^o(\Delta t)$, где W' — потери от ЧС в случае реализации мер защиты.

5. Принцип избирательности

В первую очередь реализуются те меры, которые приводят к наибольшему снижению риска при одинаковых затратах. С этой целью меры необходимо ранжировать по удельной эффективности (на единицу затрат).

6. Принцип достаточности

$$Q_0(\Delta t) \leq (Q_0(\Delta t))_n, \quad (11)$$

где $(Q_0(\Delta t))_n$ — приемлемый уровень риска (индивидуальной вероятности смерти за интервал времени Δt от рассматриваемого источника опасности).

7. Принцип оправданного риска

Всякие меры F по снижению риска призваны уменьшить денежные затраты. Отношение стоимости безопасности мер SC_f к общему сокращению риска ΔR_m

$$SC_f / \Delta R_m = LSC_f \quad (12)$$

может быть выражено в денежно-кредитных единицах на единицу повреждения или, например, в некоторой стоимости спасения человеческой жизни LSC_v .

Особый вопрос — о допустимом уровне риска.

Оценка вероятности ущерба

$$R \leq R_{adm}, \quad (13)$$

где R — риск нанесения объекту ущерба определенного уровня при опасном воздействии данной интенсивности за срок службы объекта или обозначенный период;

R_{adm} – допустимый риск.

Величина R может в общем случае быть определена по формуле

$$R = P(H) \cdot P(S/H) \cdot P(T/H) \cdot P(C/H) \cdot D, \quad (14)$$

где $P(H)$ – вероятность возникновения опасности; $P(S/H)$ и $P(T/H)$ – вероятность встречи опасности с рассматриваемым объектом в пространстве и времени; $P(C/H)$ – вероятность нанесения ущерба данного уровня разрушения, гибели людей и т.п.; D – стоимость объекта, численность населения и другие общие показатели.

Критерии допустимого риска требуют наличия соответствующих статистических данных, которые применительно к ЧС не всегда достигнуты или наличествуют.

Исходя из сравнительной оценки риска, целесообразно допустимый риск прогрессирующего раз-

рушения принимать на уровне $R = 1 \cdot 10^{-5} \dots 5 \cdot 10^{-5}$ в зависимости от объема возможных разрушений. Это в 5-10 раз выше западноевропейских показателей [10].

В терминах надежности это соответствует интервалу значений $0,99800 \dots 0,99870$. Принятая надежность $H = 0,99865$.

Предложенные принципы оценки ущерба от аварийных воздействий способны стать действенным инструментом для оценки риска отказа, определения необходимых материальных затрат для его ликвидации и обоснования инвестиций в проектируемые объекты с учетом возникновения аварийных ситуаций.

С учетом вышеизложенного необходимо дальнейшее совершенствование общей концепции оценки комбинированных особых воздействий на строительные материалы, конструкции, здания, сооружения, а также методов и средств испытания в этих условиях на основе огнеударостойкости. Использование теории риска в таких случаях приводит к приемлемым методом оценки и эффективным решениям.

Библиографический список

1. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.
2. Тамразян А.Г., Филимонова Е.А. Оптимизация железобетонных конструкций с учетом анализа риска на примере железобетонной плиты перекрытия. В сб.: Бетон и железобетон — взгляд в будущее. / Научн. тр. III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах. — 2014. — С. 365-378.
3. Тамразян А.Г., Филимонова Е.А. Структура целевой функции при оптимизации железобетонных плит с учетом конструкционной безопасности. // Промышленное и гражданское строительство. — 2013. — № 9. — С. 14-15.
4. Tamrazyan A., Avetisyan L. Estimation of load bearing capacity of eccentrically compressed reinforced concrete elements under dynamic loading in fire conditions. // Applied Mechanics and Materials. — 2014. — Т. 638-640. — С. 62-65.
5. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. Особенности работы железобетонных колонн в условиях динамических воздействия после пожара. / В сб.: Бетон и железобетон — взгляд в будущее. / Научн. тр. III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: в 7 томах. — 2014. — С. 150-160.
6. Тамразян А.Г. Огнеударостойкость несущих железобетонных конструкций высотных зданий. // Жилищное строительство. — 2005. — № 1. — С. 7.
7. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. Расчет внецентренно-сжатых железобетонных элементов на кратковременную динамическую нагрузку. // Строительство: наука и образование. — 2013. — № 4. — С. 2.
8. Тамразян А.Г. Основные принципы оценки риска при проектировании зданий и сооружений. // Вестник МГСУ, 2011. — № 2-1. — С. 21-27.
9. Тамразян А.Г. Ресурс живучести — основной критерий проектных решений высотных зданий. // Жилищное строительство. — 2010. — № 1. — С. 15-18.
10. Снижение рисков в строительстве при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера: Научное издание. / А.Г. Тамразян [и др.]; под общ. ред. Тамразяна А.Г. Изд. 2-е. — М.: Издательство АСВ, 2012.

Автор:

Ашот Георгиевич ТАМРАЗЯН, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ, Москва

Ashot TAMRAZYAN, Doctor of Sci (Eng), Full Professor, Head of Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, National Research University «Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

e-mail: tamrazian@mail.ru

тел.: +7 (495) 287-49-14 (3036, 3084), +7 (903) 730-58-43