

МЕТОДИКА РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ЕДИНИЧНУЮ ЖИВУЧЕСТЬ

Ю.И. Кудишин^{*}, Д.Ю. Дробот^{**}

Для рядового инженера-проектировщика крайне трудно ориентироваться в сложившейся на сегодняшний день чрезвычайно запутанной системе документов нормативной базы относительно вопроса проектирования конструкций, стойких к аварийным воздействиям.

Такое состояние нередко приводит к затруднениям при прохождении экспертизы, с ее неоднозначными многовариантными толкованиями определений и понятий (прогрессирующее, диспропорциональное, лавинообразное обрушение, разрушение, целостность, требуемая стойкость и т.д.) и вынуждает проектировщика априори работать вне правового поля. Подробно состояние вопроса и некоторые заблуждения рассматриваются в [1, 3].

Сегодня необходим коренной пересмотр методологии проектирования с учетом новых возможностей систем автоматизированного проектирования для создания новой единой и четкой концепции нормативной базы.

С одной стороны, согласно действующей в большинстве стран мира методике предельных состояний, проектировщику необходимо обеспечить требуемый уровень надежности сооружения в рамках предельных состояний 1-й (невозможность дальнейшей эксплуатации, например, вследствие потери несущей способности, морального устаревания и т.д.) и 2-й групп (затруднение нормальной эксплуатации, например, вследствие больших деформаций, ускорений и т.д.).

При этом надежность (англ. reliability) понимается, как свойство сооружения выполнять свое функциональное назначение с необходимым качеством в течение предусмотренного срока эксплуатации, и оценивается вероятностью безотказной работы (см. рис. 1).

^{*} Кудишин Юрий Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Металлические конструкции Московского государственного строительного университета; 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26. E-mail: kudishiny@mail.ru

^{**} Дробот Дмитрий Юрьевич, аспирант кафедры Металлические конструкции Московского государственного строительного университета; 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, дом 26; E-mail: dmitrydrobot@gmail.com.

При этом возникают некоторые трудности. Так, при проектировании выполняется поэлементный расчет, т.е. тем самым обеспечивается требуемая надежность (вероятность безотказности) каждого отдельного элемента. Такая поэлементная проверка называется методом наислабейшего элемента и присваивает всей конструкции топологию последовательного соединения элементов, что в действительности не всегда так и может свидетельствовать об имеющихся запасах несущей способности. Поскольку определить надежность всей конструкции не представляется возможным в виду крайней трудности, то надежность всего сооружения трактуется через надежность ее отдельных элементов. В результате нельзя дать ответ о фактической надежности запроектированного сооружения.

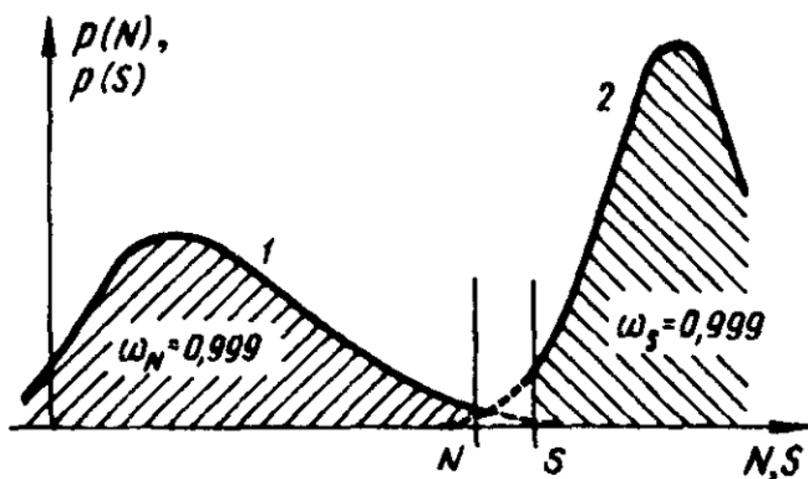


Рис. 1. Графики статистического распределения усилий (1) и несущей способности конструкции (2)

Fig. 1. Graphs of statistic effort distribution (1) and the construction's bearing capacity (2)

С другой стороны, в соответствии с системным анализом строительную конструкцию, как и любую другую систему, можно рассматривать с трех основных позиций:

Воздействия на систему (внутреннего и внешнего),

Структуры конструкции (топологической взаимосвязи ее элементов),

Реакции конструкции на воздействие и ее конечного состояния после реакции на воздействие.

Условно воздействия можно разделить на три группы:

- проектного типа и величины,
- проектного типа, но запроектной величины (например, выпадение снега в г. Москва интенсивностью sg более 180 кг/м^2),
- аварийного типа (инерционные сейсмические силы, пожар, взрыв, образование карстовых воронок и т.д.).

Такое разделение предполагает, что в конструкции от воздействий 2-й, 3-й группы могут возникнуть повреждения. Концептуально большинство воздействий аварийного типа в настоящее время относятся к 1-й группе предельных состояний. Например, сейсмические нагрузки от колебаний грунтов основания занормированы и т.о. становятся нагрузками проектного типа (см. СНиП «Строительство в сейсмических районах»). Т.к. надежность конструкции оценивается как безотказность, которая в свою

очередь отрицает возможность существенных повреждений, то возникает логическая нестыковка.

Выход из логической путаницы дает следующая трактовка проблемы: в строительстве такие проблемы как сейсмостойкость, огнестойкость, выносливость и т.д. следует рассматривать в контексте обобщенной проблемы живучести. А сами воздействия аварийного типа предлагается отнести к 3-й группе предельных состояний, как состояний с недопустимым уровнем повреждений.

Дадим системное определение термина живучесть. Живучесть (англ. robustness) – способность поврежденной системы адаптироваться к новым изменившимся и, как правило, непредвиденным ситуациям, противостоять вредным воздействиям, выполняя при этом полностью или частично свою целевую функцию, за счет соответствующего изменения структуры и поведения системы. Живучесть понимается как стойкость системы (в нашем случае конструкции) в запроектной ситуации. В зависимости от степени сложности организации и класса систем в рамках современной теории катастроф (техническая, биологическая, военная, экономическая (см.рис.2) и т.д), а также уровня анализа, свойство живучести может проявляться как сложное интегральное качество системы и, соответственно, количественно оцениваться показателями устойчивости, прочности, надежности, адаптивности, отказоустойчивости, помехоустойчивости и т.д (см. рис. 3).

Свойство живучести обеспечивается и напрямую взаимосвязано со свойством надежности. Живучесть нельзя гарантировать, если нет требуемого уровня вероятности безотказной работы оставшейся части поврежденной конструкции. В строительной сфере известны работы Пичугина С.Ф., в которых исследовалась структурная живучесть расчетных схем. Для них в качестве критерия живучести при изъятии элементов принималось условие сохранности геометрически неизменяемого остова конструкции [6].

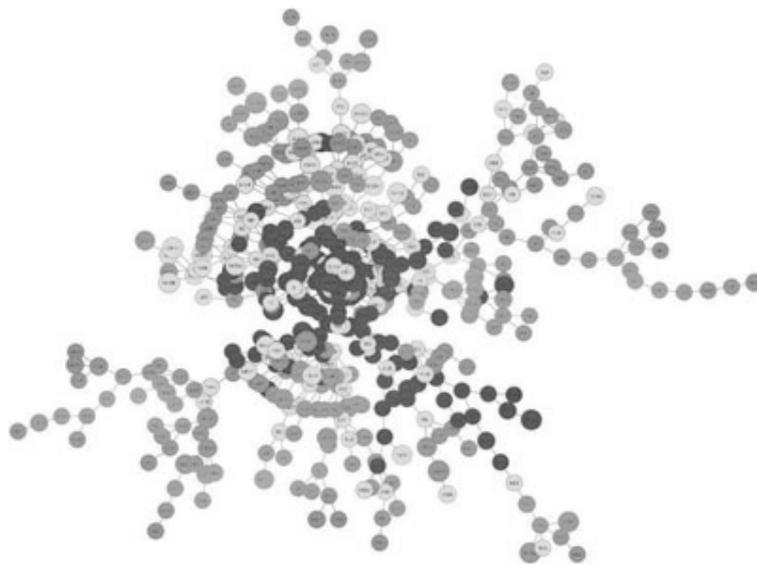


Рис.2. К анализу современного экономического кризиса. Применение аппарата теории графов к оценке живучести банковской системы США. Темным выделены банки, которые уже испытали крах летом 2008 г.

Fig.2. To the analysis of the present-day economic crisis. Application of the graph theory apparatus to the evaluation of the US banking system robustness. The banks that crashed in summer, 2008, are shown as dark circles

В последнее время нормы предписывают расчет конструкций на прогрессирующее обрушение. Последний термин, имея неудачный перевод с английского языка, подразумевает в первую очередь некоторую величину повреждения либо его характер (диспропорциональность, лавинообразность как скорость процесса). Живучесть - это, прежде всего, свойство, свойство самосохранения при повреждениях в виде полного отказа отдельных элементов конструкции и напрямую не связано с конкретным процессом разрушения. Эти два понятия лежат в разных плоскостях и их нельзя сравнивать.

В этой статье предлагается проектировать уникальные сооружения с единичным уровнем живучести. Поясним. Вне зависимости от обеспечения живучести при конкретных повреждающих воздействиях (например, при сейсмике) уникальные сооружения должны быть стойкими к неумышленным отказам в количестве не более одного. Уникальность определяется возможностью человеческих жертв, большим социальным или экономическим уроном, малой изученностью строящихся сооружений, от возможных повреждений. Принципы методики универсальны для конструкций из любых материалов (например, металла, железобетона, дерева, камня), и любого типа (каркасных, оболочечных, пространственных, плит и т.д.).

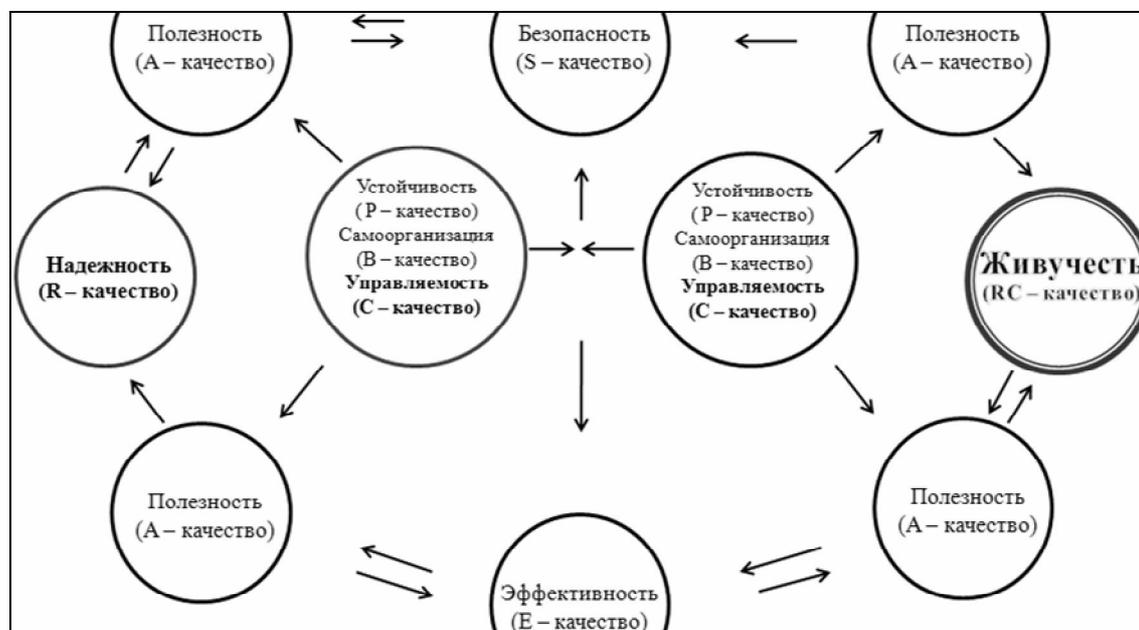


Рис. 3. Системный подход. Живучесть рассматривается как RC - качество системы (resistance characteristic), т.е. управляемость при наличии повреждений
 Fig. 3. System approach. Robustness is regarded as RC (resistance characteristic) – a quality of the system, that is, controllability with damages present

Сформулируем принципы и положения расчета уникальных сооружений на живучесть единичного уровня:

- Живучесть обеспечивается в комплексе всех систем жизнеобеспечения сооружения (несущих конструкций, пожарной безопасности, систем эвакуации, информационного обеспечения и т.д.);
- В рамках 3-го предельного состояния рассматривается (изучается) поведение конструкции в поврежденном состоянии;
- В качестве аварийных воздействий выступают отказы конструктивных элементов. Такие стартовые тестовые воздействия понимаются как неумышленные (например,

ошибка в проекте, в изготовлении элементов конструкции, ошибка при возведении), что снимает необходимость в изучении природы и нормировании величины повреждающего воздействия;

- В качестве аксиомы используется принцип единичного отказа. В соответствии с принципом, система должна выполнять свои функции при любом исходном, но только одном событии, вызывающем повреждение системы. Т.о. вероятность стартового отказа абсолютна, т.е. равна 100%. Как следствие в конструкции не допускается наличия ключевых элементов;

- Абстрактность повреждающего воздействия заключается для дискретной конструкции в мгновенном изъятии («исчезновении») любого элемента или узла, для континуальной - в мгновенном образовании разреза или изъятии области. Фактор мгновенности вызывает динамическую реакцию сооружения на повреждение (см. рис. 4 и рис. 5);

- Для реального сооружения, учитывая малую вероятность и небольшую продолжительность аварийной ситуации, рекомендуется расчет на живучесть выполнять при действии нормативных значений постоянных нагрузок и длительных составляющих временных нагрузок ($\gamma_{ni} = \gamma_{fi} = 1$);

- Узловые соединения конструктивных элементов для вновь проектируемых конструкций принимаются равнопрочными основным элементам;

- Живучесть следует исследовать в рамках логико-вероятностных моделей, уже давно применяемых и хорошо себя зарекомендовавших в таких областях человеческой жизнедеятельности как радиоэлектроника, экономика и финансы, военная сфера и т.д. В логических моделях используется аппарат теории графов для анализа топологии системы и взаимного влияния частей системы друг на друга (см. рис. 3);

- Для оценки удельного вклада частей несущей конструкции в обеспечении живучести могут использоваться данные модального анализа и энергетического портрета конструкции при наличии в ней «тестовых» повреждений. Энергетический портрет представляет собой совокупность данных об изменении потенциальной и кинетической энергии конструкции, энергии рассеивания во время ее повреждения. Современные программные комплексы позволяют вычислить частоты свободных колебаний конструкции с учетом изменения ее жесткости, даже при наличии значительных пластических деформаций в результате повреждения.

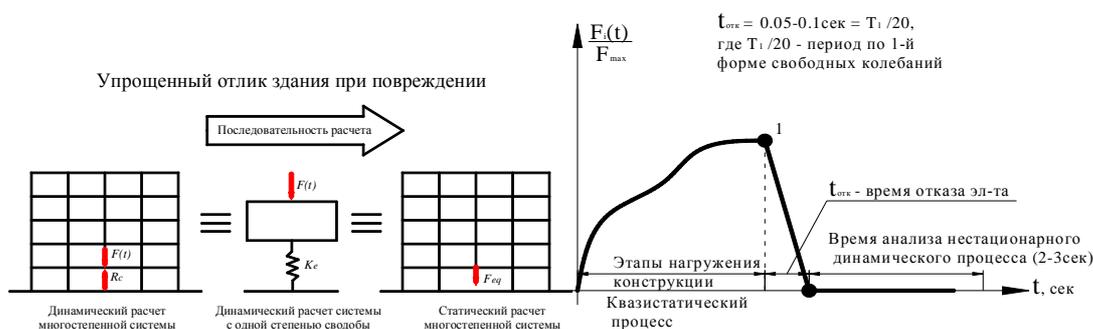


Рис. 4. К динамической задаче. Мгновенный отказ части несущей конструкции моделируется заменой внутренних усилий на границе области отказа и падением до нуля последних за короткий промежуток времени

Fig. 4. To the dynamic task. An instant failure of a part of the bearing construction is simulated by the replacement of internal forces on the border of failure area and their reduction to zero during a short-time interval

Положения, определяемые Заказчиком, впоследствии фиксируемые в специальных технических условиях (СТУ):

- Критерий обеспечения живучести. Живучесть конструкции обеспечена, если первичный отказ: а) приводит к разрушению на ограниченной области, или б) не приводит к разрушению других элементов, на которые перераспределяется нагрузка. Величина области утверждается заказчиком совместно с экспертной группой.

Формульная запись неразрушения дискретных (каркасных) элементов и континуальных частей конструкции может быть записана в следующем виде:

$$\varepsilon_{\max} \leq \gamma_i \cdot [\varepsilon_{\text{ult}}] \quad (1)$$

где:

ε_{\max} – максимальная фибровая деформация в сечении элемента,

ε_{ult} – предельная деформация, при которой происходит разрыв (в частности для металлических конструкций предельная пластическая деформация для мягких строительных сталей равна ~ 20 - 25%),

γ_i – система коэффициентов надежности.

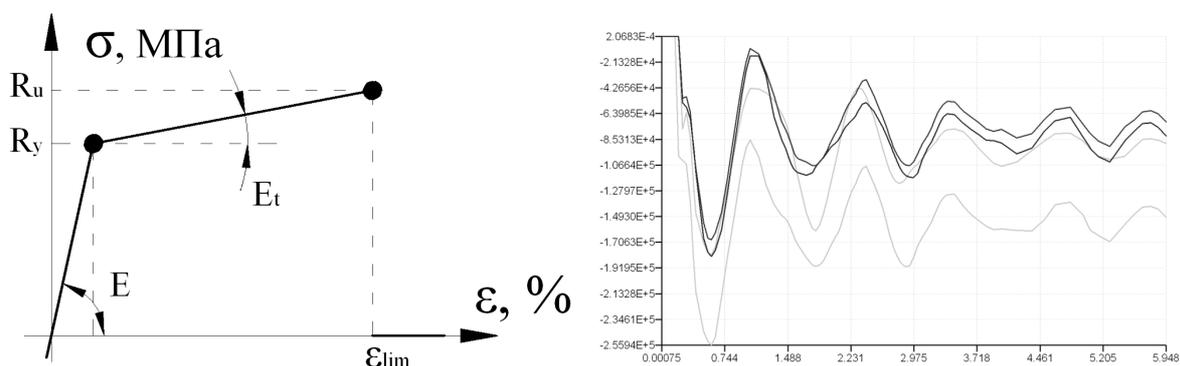


Рис.5. Слева - билинейная диаграмма работы стали под нагрузкой, справа – графики динамической реакции сооружения
 Fig.5. To the left – a bilinear diagram of steel performance under load, to the right – graphs of the construction's dynamic reaction

Заключение

Вопросы экономики. С одной стороны вышеизложенная методика базируется на требовании обеспечения единичной живучести только для уникальных сооружений. Такой уровень живучести предполагается рациональным и минимально допустимым. С другой стороны нельзя отрицать существование воздействий, которые будут приводить к отказу сразу нескольких элементов, например, удаление узла соединения нескольких элементов. Ключевым является фактора (не) умышленности воздействия. Например, терроризм (злоумышленники имеют контрзадачу разрушить сооружение) и взрыв бытового газа, который по данным статистики «сносит» сразу несколько элементов.

В 2-х последних случаях следует руководствоваться экономической целесообразностью закладываемых ресурсов для обеспечения живучести n-го уровня. Целесообразность можно оценить, используя аппарат теории риска к стартовым отказам в количестве более чем одного. А оценить степень повреждения конструкции можно, используя индекс живучести:

$$I_{RC} = \frac{R_{\max} - R}{R_{\max}} \quad (2)$$

т.е. отношение разницы между максимально возможным и уже полученным повреждением, к максимально возможному повреждению (связности). Для дискретных систем связность выражается в минимальном количестве элементов, после отказа которых система не может выполнять свою функцию.

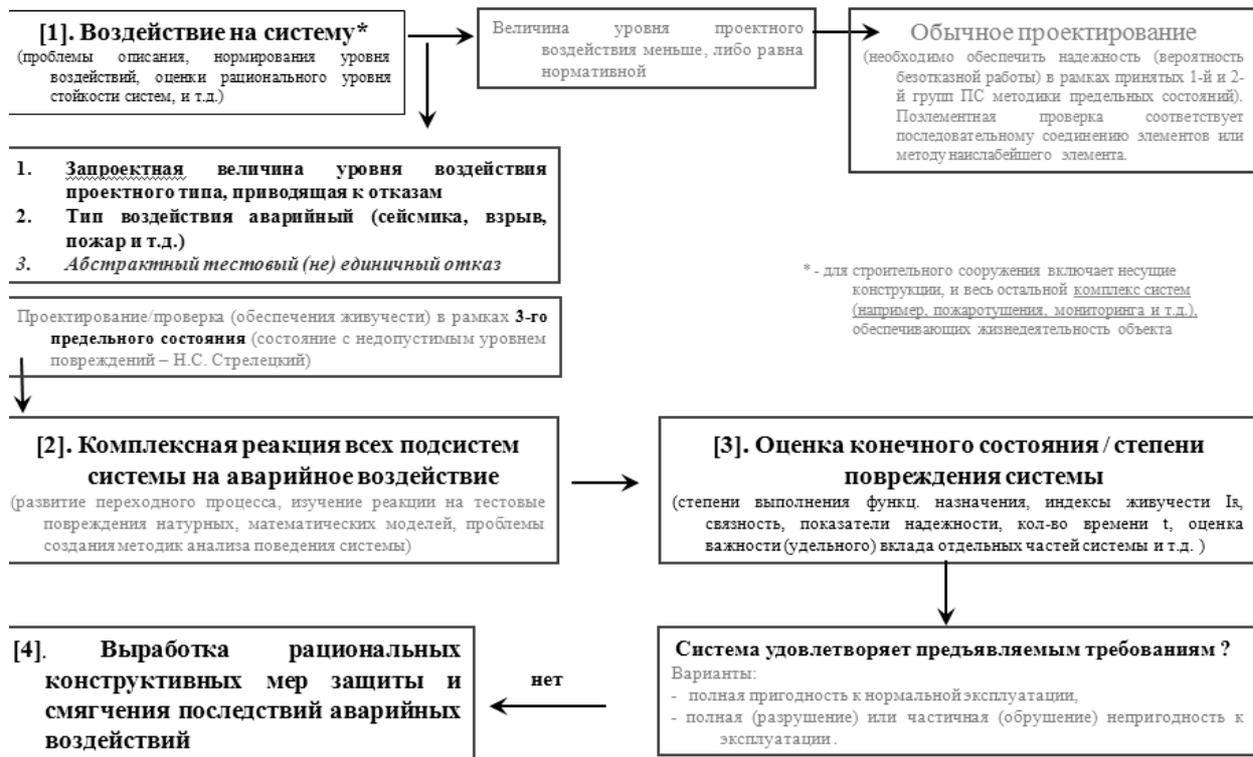


Рис. 6. Методика проектирования сооружений, стойких к аварийным воздействиям
Fig. 6. Design procedure of constructions, steadfast to the emergency actions

Литература

- [1] СТЕКОЛЬНИКОВ Ю.И. «Живучесть систем», изд-во Политехника, Санкт-Петербург, 2002.
- [2] КОЧКАРОВ А.А., МАЛИНЕЦКИЙ Г.Г. Обеспечение стойкости сложных систем. Структурные аспекты. ИМП им. М.В. Келдыша РАН, Москва, 2005.
- [3] КУДИШИН Ю.И., ДРОБОТ Д.Ю. К вопросу о живучести строительных конструкций. Строительная механика и расчет сооружений. 2(217)/2008. ФГУП «НИЦ «Строительство», «Строительная механика и расчет сооружений», 2008г.
- [4] ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения».
- [5] ГОСТ 27751-88 «Надежность строительных конструкций и оснований».
- [6] ПЕРЕЛЬМУТЕР А.В. «Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций». АСВ, Москва, 2007г.
- [7] ЕРЕМЕЕВ П.Г.. «Предотвращение лавинообразного (прогрессирующего) обрушения несущих конструкций уникальных большепролетных сооружений при аварийных воздействиях». ЦНИИСК им. Кучеренко.

- [8] Robustness of structural systems – a new focus for the joint committee on structural safety (JCSS) Applications of statistics and probability in civil engineering – Kanda, Takada 2007, London, ISBN 978-0-415-45211-3
- [9] ELLINGWOOD B.R., SMILOWITZ R. «Best practices for reducing the potential progressive collapse for in buildings», NIST, USA 2006.
- [10] D. BILOW «GSA. Progressive Collapse Design Guidelines Applied to Concrete Moment-Resisting Frame Buildings», Tri-service Infrastructure Systems Conference & Exposition, St. Louis, MO – August 2005
- [11] Brian Crowder «Definition of Progressive Collapse», NAVFAC, P.E., 2005

PROCEDURE OF CONSTRUCTIONS SINGLE ROBUSTNESS CALCULATION

Yuri I. Kudishin, Dmitry Y. Drobot

This article dwells upon the design of constructions resistant to emergency actions. We single out the existing generalized problem of robustness, which includes the issues of seismic stability, fire resistance, endurance, etc. which have been studied for a long time. These include emergency actions with the normalized level of intensity value. It is proposed to examine the issue of robustness within the framework of the 3rd group limiting conditions as states with inadmissible level of damage.

Robustness is the adaptability of a damaged system to new, changing and, as a rule, unforeseen situations, its ability to resist harmful effects, thus fulfilling in full or in part its objective function due to an appropriate change in structure and behavior of the system. Robustness is understood as the durability of a system (in our case, of a construction) in the emergency situation. Depending on the complexity degree of organizations and classes of systems within the framework of the contemporary theory of catastrophes (technical, biological, military, economic, etc.), and also the level of analysis, robustness can manifest itself as a complex integral quality of a system and, correspondingly, be evaluated quantitatively using the indices of stability, strength, reliability, adaptability, failure resistance, noise immunity and so forth.

This article suggests that unique constructions with a single level of robustness should be designed. Regardless of robustness guarantee under particular damaging influences (for example, seismic surveying), unique constructions must be resistant to at least one unpremeditated failure. The uniqueness is determined by the possibility of human losses, substantial social or economic losses resulting from possible damages and very few previous studies of constructions built. The principles of the method are universal for the constructions of any materials and of any type.

The terminology is also taken into account as we have analyzed such terms as reliability, robustness and progressive collapse.

The procedure of constructions single robustness calculation is formulated according to the following positions:

- external damaging influence (we use the principle of single failure, specify the values of structural loads applicable at the moment of failure, etc.),
- the reaction of the system to the influence (the calculation of a dynamic upsurge of internal efforts from the destroyed elements of construction),
- requirements for the final state of the system (existence and absence of damage).