POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Original
/ DE BIAGI, Valerio. - In: VESTNIK TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO ARHITEKTURNO-STROITELNOGO UNIVERSITETA. - ISSN 1607-1859. - STAMPA. - 4:(2015), pp. 92-100.

Availability:
This version is available at: 11583/2626787 since: 2016-01-07T17:37:43Z

Publisher:
Federal State Educational Institution of Higher Education «Tomsk State University of Architecture and

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

02 May 2024

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК 69.059.1:699.84

ВАЛЕРИО ДЕ БЬЯДЖИ (VALERIO DE BIAGI), PhD,
valerio.debiagi@polito.it
Политехнический университет Турина,
24, 10129, Турин, Италия

ПОВЫШЕНИЕ ЖИВУЧЕСТИ СООРУЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ УСЛОЖНЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ СХЕМ

Обеспечение живучести строительных конструкций – основное требование при проектировании. Среди способов обеспечения живучести наиболее целесообразным является рассмотрение возможных напряжённых состояний, возникающих при разрушении одного из элементов системы. Сравнение этих напряжённых состояний приводит к выводу, что наименьшие последствия разрушения при катастрофических воздействиях имеют наиболее сложные конструкции. В работе исследована зависимость между структурной сложностью и живучестью конструкции.

Ключевые слова: живучесть; несущие конструкции; экстремальное событие; структурная сложность.

Введение

Иногда частный случай может опровергнуть опыт, накопленный тысячелетиями. Употребление выражения «чёрный лебедь» для обозначения маловероятных событий восходит к римлянам. В своих сатирах Ювенал писал: «Белая ворона – редкая на земле птица, вроде чёрного лебедя». Талеб [1] утверждает, что экономика (и в общем случае – мир в целом) определяется экстремальными явлениями, которые неизвестны и не прогнозируются.

Книга И. Талеба касается не только экономики. В ней критикуется использование статистических данных в качестве единственного средства для интерпретации природных явлений. Статистика является полезным инструментом исследования в ситуациях, когда ошибками в распределении вероятностей можно пренебречь.

Во многих других случаях отклонения от математической модели реального объекта не описываются линейной комбинацией случайных параметров. Если задача нелинейная, то чувствительность к статистическим ошибкам

© Валерио де Бьяджи (Valerio de Biagi), 2015
© Перевод на русский язык, оформление. ТГАСУ, 2015
© Издание, распространение на территории РФ. ТГАСУ, 2015

резко возрастает. Талеб критикует использование статистических данных в областях, где теория вероятностей приводит к ошибкам.

Катастрофические события крайне редки, но влекут за собой тяжёлые последствия. Поэтому следует уделить внимание событиям «чёрный лебедь» с высокой степенью риска, не имеющих статистических данных.

Есть ли возможность иметь дело с «чёрными лебедями» конструкций? Ответ положительный. Основной подход заключается в переносе внимания с внешних воздействий на возможные варианты повреждений строительной конструкции. Живучесть конструкции состоит в том, чтобы повреждение одного элемента не распространялось на другие элементы.

Как упоминалось ранее, проектирование конструкций должно основываться на учёте последствий катастрофических воздействий. В работе У. Староссека и М. Вольфа [2] отмечается, что существующая практика конструирования не учитывает возможность прогрессирующего разрушения. Все нагрузки и сопротивления определяются статистически на основе экспериментальных данных. После назначения допустимой вероятности отказа расчётные значения нагрузок и сопротивлений определяются с помощью вероятностных методов. Авторы критикуют положение о том, что маловероятные нагрузки не должны учитываться при проектировании, хотя в строительстве они являются наиболее опасными.

Идея проектирования конструкций с учётом катастрофических воздействий сформулирована в начале нового тысячелетия [3]. А. Нафдей [4] «перевернул» концепцию проектирования сооружений. В вероятностной постановке при полном отсутствии событий невозможно проектировать конструкции на действие катастрофических нагрузок. Новая стратегия конструирования оптимизирует живучесть путём управления неблагоприятными последствиями, вызванными неожиданной нагрузкой. В начальной стадии конструкция проектируется в обычной вероятностной постановке. После этого отдельные элементы рассчитываются снова в зависимости от их роли в намеченной схеме катастрофических последствий.

Стратегии конструкционной надёжности

Рано утром 16 мая 1968 года жительница квартиры № 90 на 18-м этаже 22-этажного здания Ронан Пойнт в Лондоне зажгла спичку, чтобы заварить чашку чая [5]. Произошёл взрыв газа, стены квартиры были снесены, здание частично разрушилось. Это привело к началу дискуссии о живучести строительных конструкций.

Единого определения живучести пока не сформулировано, как подчёркивается в [6]. Однако в области строительства проектные нормы содержат понятие и формулируют надлежащее определение живучести. Многие из этих норм подчёркивают, что конструкции обладают живучестью, если степень разрушения значительно меньше степени возрастания нагрузки [7].

Для увеличения живучести можно использовать различные стратегии [8, 9]. Во-первых, стратегии, нацеленные на защиту конструкции от непропорционально больших разрушений. Такой подход не увеличивает сопротив-

ление конструкции, но ограничивает возможность катастрофического разрушения. Если обеспечена прочность элементов структуры, они способны сопротивляться чрезмерным нагрузкам. В этом заключается основной принцип обеспечения живучести. Ключевые элементы сохраняются, и на порядок увеличивается их способность ограничивать распространение разрушения. Эта стратегия используется в тех случаях, когда число ключевых элементов ограниченно, и они легко определяются в общей схеме конструкции [7].

Обеспечение возможности возникновения нескольких напряжённых состояний, соответствующих одной нагрузке, представляет собой один из способов увеличения живучести конструкции. Предусматривается, что альтернативные напряжённые состояния соответствуют условиям прочности и представляют собой перераспределение внутренних усилий так, чтобы разрушение не распространялось на другие элементы конструкции. Для достижения этого требования оставшиеся элементы должны быть достаточно прочными для того, чтобы воспринимать нагрузку, переданную на конструкцию после разрушения некоторых элементов. В любом случае должна быть гарантирована общая устойчивость конструкции после катастрофического воздействия. Большая проблема возникает в тех случаях, когда для увеличения живучести используется резервирование элементов в расчётной схеме: несколько возможных напряжённых состояний иногда могут вызывать стеснённое деформирование с негативными последствиями. Таких ситуаций следует избегать [8]. Ещё одна стратегия состоит в том, что для предотвращения распространения разрушения изолируются некоторые части конструкции [10]. Эффективность структурной сегментации представлена в работах [11, 12].

Стратегия структурной сегментации эффективна и в опасных, и в неопасных ситуациях [13]. В связи с вышесказанным эти подходы полезны при рассмотрении событий «чёрный лебедь».

Роль структурной сложности

Де Бьяджи [14] отмечает, что Природа приспосабливает эволюционные объекты к окружающей среде с помощью различных вариантов выживания в экстремальных ситуациях. Автор попытался перенести эти варианты в инженерную область и определить зависимость между структурной сложностью и живучестью конструкции.

Рассматривается следующий пример. Нагрузка состоит из вертикальных, горизонтальных сил и моментов, как показано на рис. 1, *а*, *б*. На двух представленных схемах одинаковы нагрузка, вертикальные и горизонтальные элементы и узлы, соединяющие эти элементы. На рис. 1, *а* рама имеет усиленную балку и колонну. На рис. 1, *б* элементы имеют одинаковое поперечное сечение. Из практики расчётов известно, что в статически неопределимых системах наибольшие усилия возникают в элементах с большей жёсткостью. Поэтому в раме на рис. 1, *а* нагрузка в основном воспринимается усиленными балкой и колонной. В раме на рис. 1, *б* нагрузка воспринимается всеми элементами равномерно. Рама на рис. 1, *а* называется простой, рама на рис. 1, *б* – сложной [15]. Определение сложности конструкции дано в работе Н. Саймона

[16] и учитывает форму, жёсткость конструкции, действующие нагрузки. Единица измерения структурной сложности основана на количестве информации, введённом С. Шенноном [17]. Здесь количество информации представлено эффективностью напряжённых состояний, предусмотренных в конструкции. Простая конструкция имеет сравнительно малое число возможных напряжённых состояний. Когда все напряжённые состояния одинаково эффективны, конструкция достигает максимальной сложности [15].

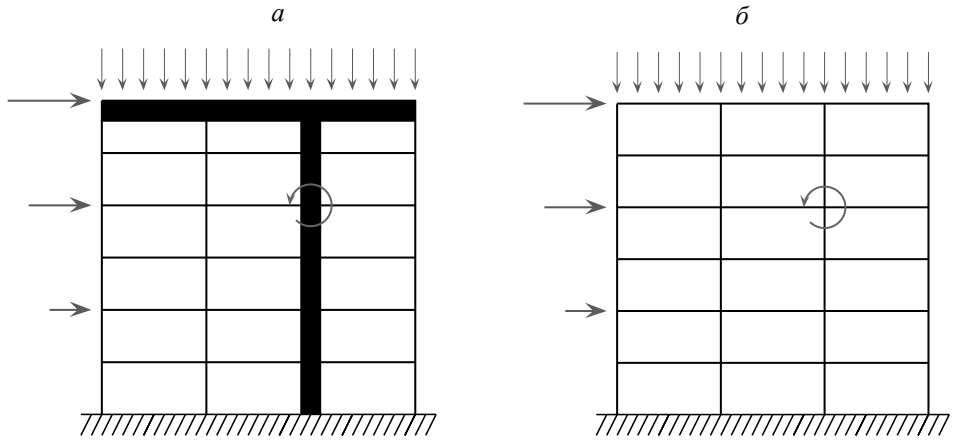

Рис. 1. Схема, рассматриваемая как простая (*а*); схема, рассматриваемая как сложная (*б*)

В статически определимых системах напряжённое состояние является единственным. Поэтому в предлагаемой теории напряжённые состояния соответствуют статически определимым системам, которые выделяются из заданной статически неопределимой системы. Эти статически определимые системы получили название «основные системы». В такой раме потенциальная энергия деформации является лучшим показателем, характеризующим работу конструкции. Он учитывает жёсткость конструкции и нагрузку, а в случае нелинейного анализа учитывается пластичность элементов. Для упругих систем энергия определяется на основе теоремы Клапейрона.

Эффективность напряжённого состояния определяется как отношение потенциальной энергии деформации заданной статически неопределимой системы к энергии деформации основной системы. Это соотношение называется коэффициентом эффективности и изменяется от 0 до 1, т. к. знаменатель всегда больше, чем числитель. Эти границы представляют собой предельные случаи, при которых напряжённое состояние или неэффективно, или эффективно. Количество основных систем и количество коэффициентов эффективности n зависит от заданной системы. Количество информации, требуемое для описания поведения системы, основано на определении информационной энтропии, введённой Шенноном [17]. В частности, индекс структурной сложности (*SCI*) определяется по формуле

$$SCI = -\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\psi_i}{\sum_{j=1}^{n}\psi_j}\log_b\frac{\psi_i}{\sum_{j=1}^{n}\psi_j}\right). \qquad (1)$$

Основание логарифма b не имеет значения. Единица измерения энтропии обладает многими интересными свойствами [18]. Возможные напряжённые состояния определяются по схеме теории графов [15].

Для сравнения уровня сложности различных конструкций вводится нормализованный параметр. Индекс структурной сложности (*SCI*) делится на его максимально возможное значение, достигаемое в ситуации с одинаковыми эффективностями возможных напряжённых состояний. В этой ситуации $SCI = \log n$, где n – число напряжённых состояний. Таким образом, нормализованный индекс структурной сложности *NSCI* определяется по формуле

$$NSCI = \frac{SCI}{\log_b n}. \qquad (2)$$

Структурная сложность и живучесть

В примере показано влияние сложности конструкции на её живучесть. Рассматривается рама (рис. 2), состоящая из 15 элементов (6 балок и 9 стоек). Элементы соединяются 9 узлами. Все элементы изготовлены из линейно-упругого материала (E = 25 ГПа) с квадратным поперечным сечением (40×40 см) [21, 22]. Нагрузка в виде сосредоточенных горизонтальных и вертикальных сил (V_i = 100 кН; H_i = 100 кН) приложена во всех узлах рамы. Число n основных систем составляет около 1183. Параметры структурной сложности равны: SCI = 9,5849; $NSCI$ = 0,9389.

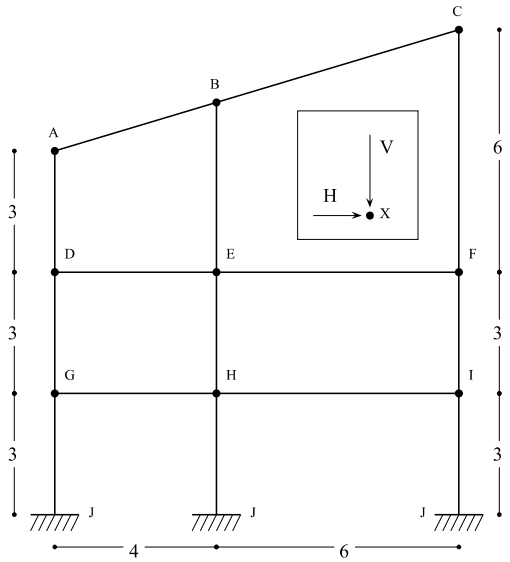

Рис. 2. Схема конструкции, предложенной для рассмотрения живучести

Влияние нормализованного индекса структурной сложности на живучесть конструкции определяется по следующей схеме:

1) формируется основная система под номером *j*. Для этого делается случайный набор размеров поперечных сечений всех элементов, кроме элемента *AB*, который имеет постоянное направление и длину. Далее прикладываются внешние нагрузки;

2) вычисляются потенциальная энергия деформации W_{mj} и индекс $NSCI_j$;

3) поочерёдно удаляется каждый элемент конструкции, и вычисляется энергия деформации для конструкции без этого элемента.

В расчёте использована выборка из 10*k* конструкций. Величины *NSCI* находятся в диапазоне 0,2691–0,9808. Безусловно, существуют конструкции, у которых величина *NSCI* находится за пределами этого диапазона, но эти конструкции не были учтены в расчёте. В табл. 1 представлено количество основных систем, которым соответствует заданный интервал изменения индекса сложности [14]. Живучесть конструкции характеризуется индексом сложности, который изменяется между своими экстремальными значениями. В примере среднее значение индекса *NSCI* = 0,7881. Тогда диапазон изменения индекса сложности: *NSCI* = (0,80; 0,90). В таблице этому диапазону соответствуют 3719 конструктивных систем.

Количество конструкций с *NSCI* в определенном интервале (набор 10*k* имитаций)

NSCI диапазон	Количество конструкций
0,00 – 0,10	0
0,10 – 0,20	0
0,20 – 0,30	3
0,30 – 0,40	21
0,40 – 0,50	109
0,50 – 0,60	516
0,60 – 0,70	1529
0,70 – 0,80	3303
0,80 – 0,90	3719
0,90 – 1,00	800

Приведённым данным соответствуют следующие экстремальные значения:

$$\min_i \frac{W_{i,j}}{W_{in,j}} = 1{,}00000008347837;$$

$$\max_i \frac{W_{i,j}}{W_{in,j}} = 1658849976505{,}83 \cdot$$

Анализ результатов показывает, что с ростом отношения $W_{i,j} / W_{in,j}$ количество событий, означающих разрушение, снижается.

Был проведён статистический анализ полученных данных. Вычислены четыре параметра в выборке из 15 систем с удалёнными стержнями: минимум, максимум, 50 и 90 процентилей.

Результаты представлены на рис. 3. Прослеживается чёткая закономерность: по мере возрастания сложности конструкции параметр $W_{i,j} / W_{in,j}$ уменьшается. Это позволяет сделать следующий вывод: с возрастанием сложности уменьшаются последствия катастрофического воздействия.

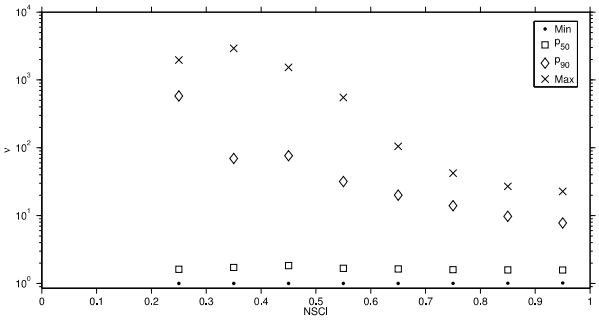

Рис. 3. График серединного минимума, 50 и 90 процентилей и максимальное отношение $W_{i,j}/W_{in,j}$ для каждого *NSCI* диапазона (набор 10*k* имитаций) [14]

В другом варианте моделирования схем разрушения было получено 25*k* конструкций. Влияние разрушения элемента оценивается с помощью параметра M_j, который вычисляется по формуле

$$M_j = -\frac{1}{15}\sum_{i=1}^{15}\frac{W_{i,j} - W_{in,j}}{W_{in,j}} . \qquad (3)$$

В результате расчёта получилось 25*k* пар чисел ($NSCI_j$, M_j). Эти пары показаны на графике (рис. 4). В работе [19] рассчитаны границы облака точек для систем с параллельными стержнями.

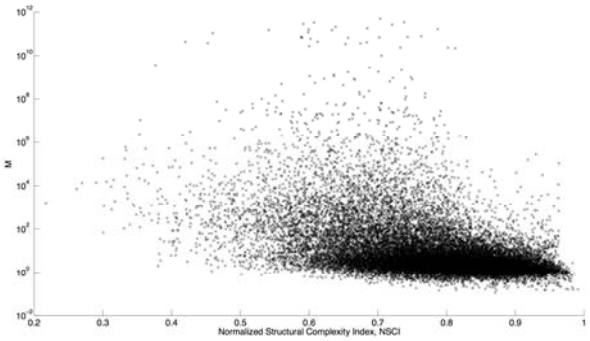

Рис. 4. Зависимость нормализованного показателя структурной сложности от *M*-величины. Каждая точка соответствует отдельному варианту моделирования (набор из 25*k* вариантов)

Заключение

Основное условие проектирования конструкций – это обеспечение живучести, т. е. надёжности при катастрофических нагрузках. Одним из основных способов обеспечения живучести является создание условий для возникновения компенсирующих напряжённых состояний. Компенсирующие напряжённые состояния возникают в так называемых сложных конструкциях. Идея сложности заимствована из природных систем.

Структурная сложность, теоретические основы которой показаны в данной статье, является новой метрической характеристикой взаимодействия возможных напряжённых состояний. Максимальная сложность соответствует максимальному взаимодействию.

Вторая часть работы посвящена зависимости живучести от нормализованного индекса структурной сложности. Этот индекс выражается через энергию деформации. Показано, что по мере возрастания сложности уменьшается зависимость конструкции от разрушенного элемента. Теоретически это означает, что увеличение показателя структурной сложности приводит к повышению живучести конструкции.

Библиографический список

1. *Taleb, N.N.* The Black Swan: *The Impact of the Highly Improbable* [Черный лебедь: Под знаком непредсказуемости]. Random House Trade Paperbacks. – 2007.
2. Starossek, U., Wolff, M. Design of collapse-resistant structures [Конструирование структур, устойчивых к обрушению]. *JCSS and IABSE workshop on Robustness of structures, building research establishment, Garston, Watford, UK.* – 2005.
3. *Abrams, D.P.* Consequence-based engineering approaches for reducing loss in mid-America [Инженерные подходы, основанные на следствии для уменьшения потерь, в Центральной Америке]. Conference on Apr 4, 2002 at Notre-Dame University. – 2002.
4. *Nafday, A.M.* Consequence-based structural design approach for Black Swan Events [Подходы к проектированию с учетом последствий событий «черного лебедя»]. Structural Safety. – 2011. – № 33. – P. 108–114.
5. *Pearson, C., Delatte, N.* Ronan Point apartment tower collapse and its effect on building codes [Обрушение здания Ronan Point и его влияние на строительные нормы и правила]. Journal of Performance of Constructed Facilities. – 2005. – № 19. – P. 172–177.
6. *Santa Fe Institute. Working definitions of robustness* [Рабочее определение надежности]. Rs-2001-009 Edition. – 2001.
7. *Starossek, U., Haberland, M.* Disproportionate collapse: terminology and procedures [Непропорциональное обрушение: термины и процессы]. Journal of Performance of Constructed Facilities. – 2010. – № 24. – P. 519–528.
8. *Knoll, F., Vogel, T.* Design for Robustness [Конструирование надежности]. International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich.
9. *Starossek, U., Haberland, M.* Robustness of structures [Надежность конструкций]. International Journal of Lifecycle Performance Engineering. 2012. – № 1. – P. 3–21.
10. *Starossek, U.* Disproportionate collapse: a pragmatic approach [Непропорциональное обрушение: прагматичный подход]. *Proceedings of the ICE-Structures and Buildings* – 2007. – № 160 – P. 317–325.
11. *Wood, J.G.* Paris airport terminal collapse: lessons for the future [Обрушение терминала в парижском аэропорту: уроки на будущее]. Structural Engineer. – 2005. – P. 83.
12. *Cennamo, C., Chiaia, B., De Biagi, V., Placidi, L.* Monitoring and compartimentalized structures [Мониторинг и изолированные конструкции]. Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik – accepted, in print.

13. *Diamantidis, D., Vogel, T.* Designing for robustness [Проектирование надежности]. Structural robustness design for practising engineers - COST Action TU0601 Robustness of structures. – 2011. – P. 65–84
14. *De Biagi V.* Complexity and robustness of structures against extreme events. PhD Thesis [Сложность и надежность конструкций и экстремальные события. Дисс. PhD], Politecnico di Torino. – 2014.
15. *De Biagi, V., Chiaia, B.* Complexity and robustness of frame structures [Сложность и надежность рамных конструкций]. International Journal of Solids and Structure. – 2013. – № 50. – P. 3723–3741
16. *Simon, H.A.* The architecture of complexity [Архитектура сложности]. *Proceedings Of The American Philosophical Society.* – 1962. – № 106. – P. 467–482.
17. *Shannon, C.E.* A mathematical theory of communication [Математическая теория связи]. Bell System Technical Journal. – 1948. – № 27. – P. 379–423.
18. *Gray, R.* Entropy and Information Theory [Энтропия и теория информации]. 2011. – Springer-Verlag, Wien.
19. *De Biagi V., Chiaia, B.* Damage tolerance in parallel systems [Устойчивость к разрушению в параллельных системах]. – submitted.
20. *De* Biagi*, V., Chiaia, B.* Scaling in structural complexity [Масштабирование со структурной сложностью]. Complexity. – 2014. – № 20. – P. 57–63.
21. *De Biagi, V., Chiaia, B.* Robustness of structures: Role of graph complexity [Надежность структур: роль графической сложности] – *IABSE Symposium Report. International Association for Bridge and Structural Engineering.* – 2013. – № 100. – P. 136–143.
22. *De Biagi, V., Chiaia, B.M., Placidi, L.* Complexity and robustness of frame structure [Сложность и надежность рамных конструкций]. – *XXI Congresso AIMETA, Torino.* – 2013 – P. 131.