

УДК 624.046

DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-2-215-224

**ОЦЕНКА ЖИВУЧЕСТИ ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ
СТАЛЬНОЙ БАШЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ
С УЧЕТОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ***

© 2020 г.

Ерофеев В.И.¹, Самохвалов И.А.^{2,3}

*¹Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального
исследовательского центра «Институт прикладной физики*

Российской академии наук», Нижний Новгород, Российская Федерация

*²Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

*³Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

erof.vi@yandex.ru, vantys1994@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.10.2019

Проведено численное исследование живучести фланцевого узла при достижении критической нагрузки и при наличии дефекта в одной из областей конструкции. Выполнен эксперимент по определению аэродинамических коэффициентов, которые необходимы для вычисления ветрового давления на опорные ноги металлической башни. Расчет напряженно-деформированного состояния проводится с применением программных комплексов SCAD Office и IDEA StatiCa 10.0. После вычисления усилий в стержневой модели конструкции формируется и подготавливается к расчету трехмерная пластинчатая модель узла.

Анализ результатов расчета позволил выявить, что в проектном (бездефектном) состоянии конструкции запас прочности несущих узлов и элементов составляет 35–40% (эквивалентные напряжения составили 165 МПа). При наличии дефекта в металлоконструкциях пояса в области фланца эквивалентные напряжения возрастают до 247,6 МПа в области скола (дефектного отверстия), то есть запас по несущей способности падает до 0,4%. В результате проведенной оценки живучести фланцевого соединения было выявлено, что соединение обладает высокой потенциальной живучестью, в свою очередь, сам фланец способен работать при наличии некоторых дефектов, не снижая своей несущей способности до критического уровня. Для стали С245 с учетом наличия пластических деформаций (до 3,5%) расчетное сопротивление принималось равным 248,4 МПа.

Полученные аэродинамические коэффициенты позволяют определить ветровую нагрузку на данный тип профиля и могут быть использованы при проектных расчетах башенных конструкций на ветровые нагрузки.

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00715-а).

Ключевые слова: живучесть, аэродинамический коэффициент, аэродинамическая установка, анализ отказов, метод конечных элементов, характеристики среднего и пульсационного давления.

Введение

Башенные и мачтовые опоры представляют собой особый класс металлоконструкций, потребность в которых сильно возросла в последние годы. Эта потребность заключается не только в создании новых опор, но и в возможности надежной эксплуатации уже существующих конструкций.

Анализ отказов элементов башен показывает, что опоры являются достаточно надежным элементом подобных конструкций, и только 9–13% случаев отказов связано с повреждением элементов опор [1]. Чаще всего такие объекты сооружаются на открытой местности, и основной причиной разрушения опор является ветровая нагрузка. Именно направление и скорость ветровой нагрузки принимаются в качестве исходных данных при определении расчетных горизонтальных нагрузок [2].

Для повышения безопасности эксплуатации объекта предлагается обеспечение его таким качеством, как живучесть. Свойство живучести конструкции проявляется только в результате аварийного воздействия, которое приводит к выходу из строя какого-либо элемента конструкции.

Как отмечается в [3, 4], возникновение термина «прогрессирующее обрушение» («progressive collapse»), из которого было получено понятие живучести, связано с рядом трагических событий, общим для которых был фактор диспропорциональности между причиной (аварийным событием) и величиной конечного повреждения. Так, первым из таких событий стало обрушение бокового фасада здания «Ronan Point» в Англии в 1968 году, вызванное взрывом бытового газа на 18-м этаже, который привел к разрушению наружной панели, служившей опорой для вышележащих панелей. После трагедии появились изменения в нормативной базе Англии – в ноябре 1968 года были изданы «Стандарты по недопущению ПО в крупнопанельных конструкциях». В этих стандартах впервые были зафиксированы такие термины, как альтернативный путь нагрузки, сплошность и случайная нагрузка.

Одним из первых среди отечественных ученых, затронувших проблему живучести в строительстве исходя из критерия выполнения поврежденной конструкцией функционального назначения, был Н.С. Стрелецкий [5]. В дальнейшем понятие живучести, как способности объекта удовлетворять требованиям безопасности несмотря на отказы или предварительные воздействия, в свои исследования вводит Г.А. Гениев [6].

В настоящее время концептуальные вопросы живучести строительных конструкций затрагиваются в публикациях А.В. Перельмутера [7], В.О. Алмазова и С.А. Белова [8], А.М. Белостоцкого [9], Ю.И. Кудишина и Д.Ю. Дробота [10] и др. [11–14]. Систематизирующей достижения перечисленных авторов является монография Ю.И. Стекольниковой [15]. В ней обобщаются концептуальные вопросы теории живучести систем: методологические аспекты, характеристики, показатели и критерии живучести.

Рассматривая зарубежные достижения в области живучести конструкций, необходимо отметить публикации [16–18], в которых приведены методы расчета против прогрессирующего обрушения, стратегии, основанные на учете установленных чрезвычайных нагрузок, а также на ограничении размера локализованного разру-

шения. В исследованиях [19–21] указано, что конструкции должны быть запроектированы так, чтобы они не были повреждены при наступлении аварийных событий: взрыв, удар, локальный дефект и др. В [22–24] приведены методы косвенного, прямого, альтернативного пути нагружения, особой локальной прочности, а также пути сокращения вероятности прогрессирующего обрушения и тематические исследования живучести конструкций.

В настоящей статье предлагаются результаты экспериментального исследования в аэродинамической трубе опорной ноги башни, на основе которых оценивается живучесть фланцевого соединения башни.

1. Постановка задачи

Объектом исследования является фланцевый узел сложного U -образного сечения проектируемого башенного сооружения. Конструкция узла и основных несущих элементов принята в соответствии с возможностями завода-изготовителя и на основе опыта проектирования фланцевых соединений. Основная цель – численное исследование состояния фланцевого узла при достижении критической нагрузки и при наличии дефекта в одной из областей конструкции с учетом вычисленных значений аэродинамических коэффициентов, действующих на элементы башенной конструкции. Такой расчет оценивает свойства живучести. Если при отказе отдельных несущих элементов (или узлов) конструкция обладает способностью перераспределения усилий на соседние элементы, то можно считать, что она обладает потенциальной живучестью [25–27].

Таким образом, для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- вычисление новых значений аэродинамических коэффициентов для профиля U -образного сечения;
- выполнение численного расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) фланцевого соединения элемента U -образного сечения (в проектном и дефектных состояниях);
- анализ НДС фланцевого соединения при критической и закритической нагрузках.

2. Экспериментальные исследования

Для получения значений аэродинамических коэффициентов проводился эксперимент по продувке опорных металлических ног в аэродинамической трубе.

Была изготовлена часть металлического пояса башни длиной 1 м. На пересечении направляющих модели были закреплены трубки, которые поочередно подключались к микроманометру. Скорость воздушного потока V определялась с помощью чашечного анемометра. Схема установки представлена на рис. 1, где обозначено: 1 – вентилятор, 2 – аэродинамическая труба, 3 – объект исследования, 4 – воздушный поток, 5 – микроманометр.

Значения аэродинамического коэффициента вычислялись по формуле $C = P_1/P_2$, где P_1 – давление, создаваемое ветровым потоком в каждой из 12 точек конструкции, P_2 – давление, создаваемое ветровым потоком на всю исследуемую конструкцию в целом. Значения P_1 определялись экспериментально микроманометром ММН-240 согласно методике, описанной в [2], величина P_2 рассчитывалась по формуле $P_2 = \rho V^2/2$ при усредненной плотности воздуха $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

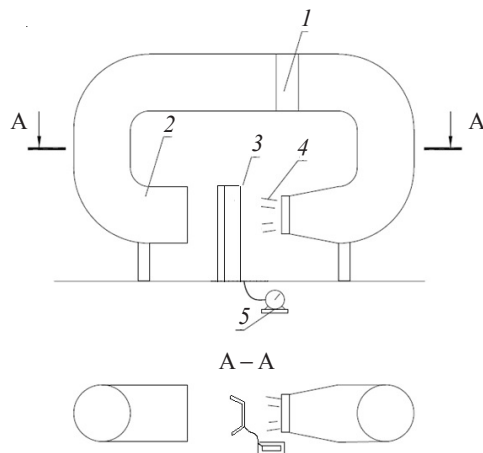


Рис. 1. Схема установки

Зная значения аэродинамического коэффициента, можно определить реальную нагрузку, действующую в каждой точке сооружения, используя методику, предлагаемую в [2].

Было проведено по 6 продувок для каждой из трех опорных ног рассматриваемой башни. Измеренная анемометром скорость ветрового потока $V = 3,6$ м/с. Получены результаты:

нога первой секции

$$P_1^{\text{сред}} = 12,556 \text{ Па}, \quad P_2^{\text{сред}} = 7,776 \text{ Па}, \quad C_{\text{сред}} = 1,61;$$

нога третьей секции

$$P_1^{\text{сред}} = 12,009 \text{ Па}, \quad P_2^{\text{сред}} = 7,776 \text{ Па}, \quad C_{\text{сред}} = 1,54;$$

нога пятой секции

$$P_1^{\text{сред}} = 12,164 \text{ Па}, \quad P_2^{\text{сред}} = 7,776 \text{ Па}, \quad C_{\text{сред}} = 1,56.$$

3. Исследование НДС фланцевого соединения

Проведен расчет НДС металлической башни высотой 40 метров с учетом приложения всех нагрузок (рис. 2). Были получены максимальные усилия в рассматриваемом фланцевом соединении на отметке +30,000 м. Этот узел был выбран, так как именно в нем имеют место перелом поясов башни и невыгодные сочетания усилий.

Фланцевое соединение было смоделировано в программном комплексе IDEA StatiCa 10.0 (рис. 3).

В основе программы лежит компонентный метод конечных элементов (КМКЭ). Суть его заключается в том, что узел рассматривается как совокупность связанных друг с другом элементов – компонентов. Для заданного узла по определенным правилам строится расчетная модель, состоящая из упругих связей и стержневых элементов, воспринимающих продольные, поперечные, изгибные и крутильные деформации. В результате расчета в каждом компоненте определяются усилия и напряжения, которые в дальнейшем могут быть использованы для необходимых проверок узла (на прочность, устойчивость и др.) в соответствии с требуемыми нормами проектирования. Программа разработана инженерами из Чехии на базе компании IDEA StatiCa. Расчетный комплекс полностью сертифицирован и соответствует нормам РФ (сертификат соответствия RA.CZ.AB86.H01166 [29]).

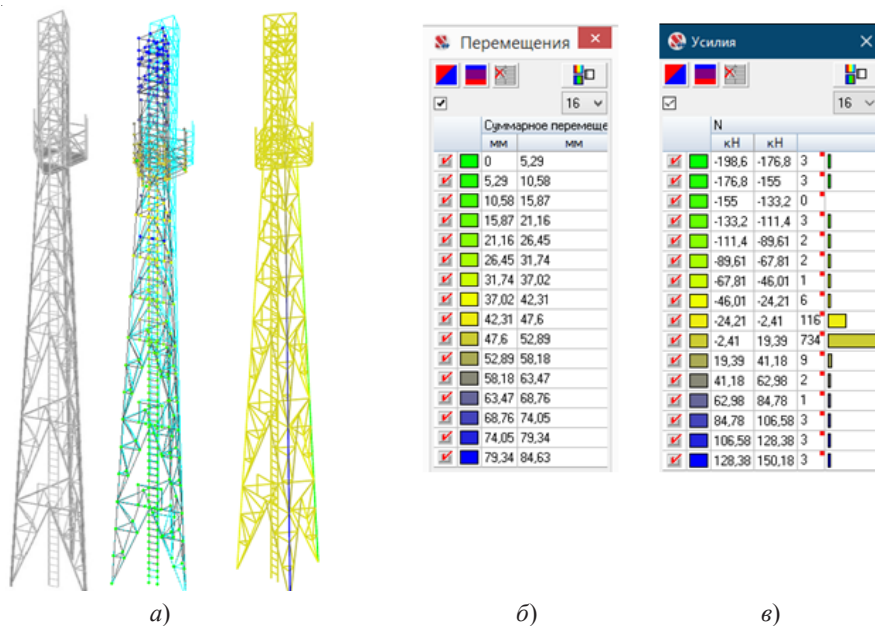


Рис. 2. Результаты расчета НДС башни: а) конечно-элементная модель башни; б) деформации башни, мм; в) значения продольных усилий, кН

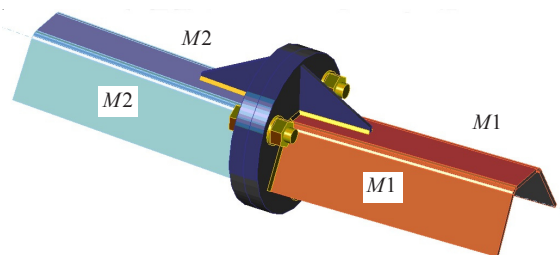


Рис. 3. Модель рассматриваемого узла

Первая часть расчета проведена с применением программного комплекса SCAD Office, основанного на методе конечных элементов. В состав системы входит высокопроизводительный вычислительный комплекс SCAD, а также ряд проектирующих и вспомогательных программ, которые позволяют комплексно решать вопросы расчета и проектирования стальных и железобетонных конструкций. Официальный разработчик – компания SCAD Soft. Программа полностью сертифицирована и соответствует нормам РФ (ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126–93, ГОСТ 28195-89, ГОСТ Р ИСО 9127–94, РД 50–34.698–90).

Был принят тип 5 расчетной схемы – система общего вида. Получены усилия во всех элементах металлической башни, а также в рассматриваемом узле (см. рис. 3). Далее с помощью программного комплекса IDEA StatiCa 10.0 был смоделирован фланцевый узел конструкции на отметке +30,000 м, на него были наложены закреплении в соответствии с расчетной схемой и усилия в элементах в соответствии с результатами статического расчета от комбинаций нагрузок.

Рассмотрено несколько состояний соединения:

- 1) проектное (бездефектное) состояние металлоконструкций узла;
- 2) наличие дефекта в металлоконструкциях пояса в области фланца (скол ме-

талла в виде отверстия пятиугольной формы, диаметр описанной окружности 2 см);

3) наличие дефекта во фланце (скол части металла на одной фланцевой пластине в виде квадратного отверстия площадью 3 см² на расстоянии 10 см от ее края, а также удаление одного активного болта из соединения).

Программный комплекс IDEA StatiCa 10.0 позволяет проводить анализ конструкции с учетом пластических деформаций, которые отображаются на расчетной схеме и распределяются по цветовому градиенту. В результате были получены эквивалентные напряжения в рассматриваемых узлах (рис. 4, 5).

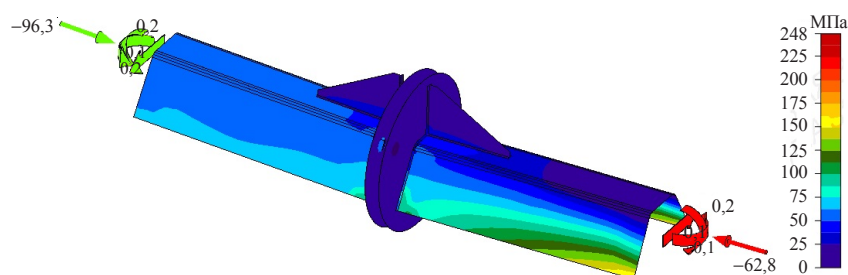


Рис. 4. Эквивалентные напряжения в элементах фланцевого узла

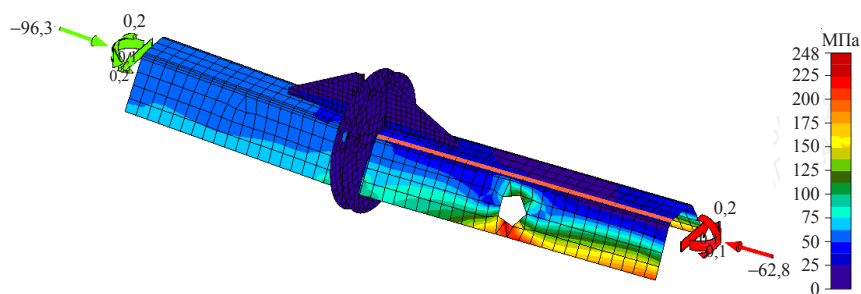


Рис. 5. Эквивалентные напряжения в элементах фланцевого узла с дефектом №1

Заключение

В проектном (бездефектном) состоянии конструкции с запасом прочности в несущих элементах порядка 35–40% эквивалентные напряжения составили 165 МПа. При наличии дефекта в металлоконструкциях пояса в области фланца эквивалентные напряжения возрастают до 247,6 МПа в области скола (дефектного отверстия), таким образом, запас по несущей способности падает до 0,4%.

Наличие дефекта в ребре жесткости не привело к значительному уменьшению несущей способности (скол металла в виде отверстия пятиугольной формы, диаметр описанной окружности 2 см).

Результаты расчета при наличии дефекта в самом фланце (скол части металла и отказ одного из «активных» болтов) показали, что данный дефект не ведет к снижению несущей способности всей конструкции, но перераспределяет усилия.

Для стали С245 с учетом пластических деформаций (до 3,5%) расчетное сопротивление принималось равным 248,4 МПа. Порог этого значения не был превышен, что говорит о запасе несущей способности соединения при возникновении дефекта.

В результате проведенной оценки живучести фланцевого соединения было выявлено, что фланцевое соединение обладает довольно высокой потенциальной жи-

вучеством по сравнению с несущими элементами поясов башни, для которых скол части конструкции приводит к резкому уменьшению несущей способности. В свою очередь, сам фланец при наличии некоторых дефектов не снижает своей несущей способности и несущей способности болтов.

Список литературы

1. Самохвалов И.А., Ерофеев В.И. Влияние дефектов в опорной ноге металлической башни высотой 72 метра на напряженно-деформированное состояние ее конструкции. *Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКом – 2018): Тр. науч.-техн. конф.* Москва, 4-5 дек. 2018. М.: ИМАШ РАН, 2018. С. 241–242.
2. Пичугин С.Ф., Махинько А.В. *Ветровая нагрузка на строительные конструкции.* Полтава: АСМІ, 2005. 342 с.
3. Crowder Brian. *Devil in Details.* Washington, D.C.: Naval Facilities Engineering Command, 2005. 12 p.
4. Crowder Brian. *Definition of Progressive Collapse.* Washington, D.C.: Naval Facilities Engineering Command, 2005. 10 p.
5. Стрелецкий Н.С. Анализ процесса разрушения упругопластической системы. В кн. *Избранные труды.* М.: Стройиздат, 1975. 422 с.
6. Гениев Г.А. К оценке резерва несущей способности железобетонных статически неопределимых стержневых систем после запроектных воздействий. *Критические технологии в строительстве: Сб. докл. конф.* М.: МГСУ, 1998. С. 60–67.
7. Перельмутер А.В. *Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций.* М.: Изд-во АСВ, 2011. 256 с.
8. Алмазов В.О., Белов С.А., Набатников А.М. Предотвращение прогрессирующего разрушения. *Городской строительный комплекс и безопасность жизнеобеспечения граждан: Сб. докл.* М.: МГСУ, 2004. С. 11.
9. Белостоцкий А.М. Численное моделирование в экспертных исследованиях причин обрушения и локального разрушения конструкций большепролетных зданий. *Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций.* 2008. Т. 4. №2. С. 26–27.
10. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. К вопросу о живучести строительных конструкций. *Строительная механика и расчет сооружений.* 2008. №2 (217). С. 36–43.
11. Ведяков И.И., Еремеев П.Г. К статье «К вопросу о живучести строительных конструкций». *Строительная механика и расчет сооружений.* 2008. № 4 (219). С. 76–78.
12. Грачев В.Ю., Вершинина Т.А., Пузаткин А.А. *Непропорциональное разрушение. Сравнение методов расчета.* Екатеринбург: Ажур, 2010. 81 с.
13. Кулябко В.В. Моделирование динамических процессов прогрессирующего разрушения сооружений. *Особенности проектирования и расчета пространственных конструкций на прочность устойчивость и прогрессирующее обрушение: Тез. докл.* М., 2009. С. 50–51.
14. Тамразян А.Г., Мехрализаде А. Особенности влияния времени локального повреждения при расчете зданий на прогрессирующее обрушение. *Вестник гражданских инженеров.* 2013. №6 (41). С. 42–46.
15. Стекольников Ю.И. *Живучесть систем.* СПб.: Политехника, 2002. 155 с.
16. *General Services Administration Washington. DC Draft. Progressive Collapse Analysis Draft, Progressive Collapse Analysis Office Buildings and Major Modernization Projects.* 2003.
17. Haberland M., Starossek U. Progressive collapse nomenclature. *ASCE SEI 2009 Structures Congress: Proceedings.* Austin, Texas, Apr. 29 – May 2. 2009. P. 1886–1895.
18. Haberland M. Progressiver Kollaps und Robustheit (Progressive collapse and robustness). Hamburg university of technology, Structural analysis and steel structures institute. *Diploma Thesis.* 2007. (In German).
19. Pujol S., Smith-Pardo J.P. A new perspective on the effects of abrupt column removal. *Engineering Structures.* 2009. Vol. 31. Iss. 4. P. 869–874. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.11.022.
20. Wald F. et al. *Benchmark Cases for Advanced Design of Structural Steel Connections.* Praha: Česká Technika, 2016. 188 p.

21. Abruzzo J., Matta A., Panariello G. Study of mitigation strategies for progressive collapse of a reinforced concrete commercial building. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2006. Vol. 20. No 4. P. 384–390. DOI: 10.1061/(asce)0887-3828(2006)20:4(384).
22. Ellingwood B.R., Robert S., Dusenberry D.O., Dat D., Lew H.S. *Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings*. Gaithersburg, USA: National Institute of Standards and Technology. 2007. 214 p. DOI:10.6028/nist.ir.7396.
23. Agnew E., Marjanishvili S. Dynamic analysis procedures for progressive collapse. *Structure*. 2006. Vol. 24. P. 24–27.
24. Vlassis A., Izzuddin B., Elghazouli A., Nethercot D. Progressive collapse of multi-storey buildings due to failed floor impact. *Engineering Structures*. 2009. Vol. 31. Iss. 7. P. 1522–1534. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.009>.
25. Тестоедов П.С., Трянина Н.Ю. Исследование вопросов живучести висячего сетчатого покрытия. *Великие реки – 2014: Труды конгресса*. Н. Новгород: ННГАСУ, 2014. С. 157–159.
26. Canisius T.D., Sørensen J.D., Baker J.W. Robustness of structural systems – a new focus for the joint committee on structural safety. In: *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*. London: Taylor & Francis Group, 2007. P. 1–8.
27. Dusenberry D.O., Hamburger R.O. Practical means for energy-based analyses of disproportionate collapse potential. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2006. Vol. 20. No 4. P. 336–348. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:4(336).
28. СП 20.13330.2016. *Нагрузки и воздействия*. М.: Минрегион России, 2016. 105 с.
29. Sabatka L., Wald F., Kabelae J. et al. Structural analysis and design of steel connections using component-based finite element model. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2015. Vol. 9. P. 895–901. DOI:10.17265/1934-7359/2015.08.002.

References

1. Samokhvalov I.A., Erofeev V.I. Vliyanie defektov v opornoj noge metallicheskoj bashni vysotoj 72 metra na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie ee konstruksii [The effect of defects in the supporting leg of a metal tower 72 meters high on the stress-strain state of its structure]. *Zhivuchest i konstruksionnoe materialovedenie (ZhivKoM – 2018): Tr. nauch.-tekhn. conf. [Survivability and Structural Materials Science (SSMS – 2018): Conference Proceeding]*. Moscow, 4-5 Dec. 2018. Moscow. IPMASH RAS Publ. 2018. P. 241–242 (In Russian).
2. Pichugin S.F., Makhin'ko A.V. *Vetrovaya nagruzka na stroitelnye konstruksii [Wind Load on Building Structures]*. Poltava. ASMI Publ. 2005. 342 p. (In Russian).
3. Crowder Brian. *Devil in Details*. Washington, D.C. Naval Facilities Engineering Command. 2005. 12 p.
4. Crowder Brian. *Definition of Progressive Collapse*. Washington, D.C. Naval Facilities Engineering Command. 2005. 10 p.
5. Streletskiy N.S. Analiz protsessa razrusheniya uprugoplasticheskoj sistemy. V kn.: *Izbrannye trudy* [Analysis of the process of destruction of an elastoplastic system]. In: *Selected Works*. Moscow. Stroyizdat Publ. 1975. 422 p. (In Russian).
6. Geniev G.A. K otsenke rezerva nesushchey sposobnosti zhelezobetonnykh staticheski neopredelimykh sterzhnevyykh sistem posle zaproektnykh vozdeystviy [To the assessment of the load-bearing capacity reserve of reinforced concrete statically indeterminate rod systems after beyond design basis impacts]. *Kriticheskie tekhnologii v stroitelstve: Sbornik dokladov konferentsii [Critical Technologies in Construction: Proceedings of Conf.]*. Moscow. MGSU Publ. 1998. P. 60–67 (In Russian).
7. Perel'muter A.V. Izbrannye problemy nadezhnosti bezopasnosti stroitelnykh konstruksiy [Selected Problems of Reliability and Safety of Building Structures]. Moscow. ASV Publ. 2011. 256 p. (In Russian).
8. Almazov V.O., Belov S.A., Nabatnikov A.M. Predotvrashchenie progressivnykh razrusheniy [Prevention of progressive destruction]. *Gorodskoy stroitelnyy kompleks i bezopasnost zhizneobespecheniya grazhdan: Sbornik dokladov [Urban Construction Complex and Security of Life Support for Citizens: Proceedings of Conf.]*. Moscow. MDSU Publ. 2004. P. 11 (In Russian).
9. Belostotskiy A.M. Chislennoe modelirovanie v ekspertnykh issledovaniyakh prichin obrushe-

niya i lokalnogo razrusheniya konstruktsiy bolsheproletnykh zdaniy [Numerical modeling in expert studies of the causes of collapse and local destruction of structures of large-span buildings]. *Mezhdunarodnyy zhurnal po raschetu grazhdanskikh i stroitelnykh konstruktsiy* [International Journal for Computational Civil and Structural Engineering]. 2008. Vol. 4. Iss. 2. P. 26–27 (In Russian).

10. Kudishin Yu.I., Drobot D.Yu. K voprosu o zhivuchesti stroitelnykh konstruktsiy [To the question of survivability of building structures]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. [Structural Mechanics and Calculation of Structures]. 2008. No 2 (217). P. 36–43 (In Russian).

11. Vedyakov I.I., Ereemeev P.G. K stat'e "K voprosu zhivuchesti stroitelnykh konstruktsiy" [To the paper "On the issue of survivability of building structures"]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural Mechanics and Calculation of Structures]. 2008. No 4 (219). P. 76–78 (In Russian).

12. Grachev V.Yu., Vershinina T.A., Puzatkin A.A. *Neproportionalnoe razrushenie. Sravnenie metodov rascheta* [Disproportionate Destruction. Comparison of Calculation Methods]. Ekaterinburg. Azhur Publ. 2010. 81 p. (In Russian).

13. Kulyabko V.V. Modelirovanie dinamicheskikh protsessov progressivnykh razrusheniya sooruzheniy [Modeling the dynamic processes of the progressive destruction of structures]. *Osobennosti proektirovaniya i rascheta prostranstvennykh konstruktsiy na prochnost, ustoychivost i progressivnyy obrushenie: Tezisy dokladov* [Features of the Design and Calculation of Spatial Structures for Strength Stability and Progressive Collapse: Abstracts]. Moscow. 2009. P. 50–51 (In Russian).

14. Tamrazian A.G., Mechrizadech A. Osobennosti vliyaniya vremeni lokalnogo povrezhdeniya pri raschete zdaniy na progressivnyy obrushenie [Feature of influence of local damage time at calculating buildings for progressive collapse]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. 2013. No 6 (41). P. 42–46 (In Russian).

15. Stekolnikov Yu.I. *Zhivuchest system* [System Survivability]. Saint Petersburg. Politehnika Publ. 2002. 155 p. (In Russian).

16. *General Services Administration Washington. DC Draft. Progressive Collapse Analysis Draft, Progressive Collapse Analysis Office Buildings and Major Modernization Projects*. 2003.

17. Haberland M., Starossek U. Progressive collapse nomenclature. *ASCE SEI 2009 Structures Congress: Proceedings*. Austin, Texas. Apr. 29 – May 2. 2009. P. 1886–1895.

18. Haberland M. *Progressiver Kollaps und Robustheit (Progressive collapse and robustness)*. Hamburg university of technology, Structural analysis and steel structures institute. *Diploma Thesis*. 2007. (In German).

19. Pujol S., Smith-Pardo J.P. A new perspective on the effects of abrupt column removal. *Engineering Structures*. 2009. Vol. 31. Iss. 4. P. 869–874. DOI: 10.1016/j.engstruct.2008.11.022.

20. Wald F. et al. *Benchmark Cases for Advanced Design of Structural Steel Connections*. Praha. Česká Technika. 2016. 188 p.

21. Abruzzo J., Matta A., Panariello G. Study of mitigation strategies for progressive collapse of a reinforced concrete commercial building. *J. Perform. Constr. Fac.* 2006. Vol. 20. No 4. P. 384–390. DOI: 10.1061/(asce)0887-3828(2006)20:4(384).

22. Ellingwood B.R., Robert S., Dusenberry D.O., Dat D., Lew H.S. *Best Practices for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings*. Gaithersburg, USA. National Institute of Standards and Technology. 2007. 214 p. DOI: 10.6028/nist.ir.7396.

23. Agnew E., Marjanishvili S. Dynamic analysis procedures for progressive collapse. *Structure*. 2006. Vol. 24. P. 24–27.

24. Vlassis A., Izzuddin B., Elghazouli A., Nethercot D. Progressive collapse of multi-storey buildings due to failed floor impact. *Eng. Struct.* 2009. Vol. 31. Iss. 77. P. 1522–1534. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.009>.

25. Testoedov P.S., Tryanina N.Yu. Issledovanie voprosov zhivuchesti visyachego setchatogo pokrytiya [Suspended Mesh Survival Study]. *Velikie reki – 2014: Trudy kongressa* [Great Rivers – 2014: Congress Proceedings]. Nizhny Novgorod. NNGASU Publ. 2014. P. 157–159.

26. Canisius T.D., Sørensen J.D., Baker J.W. Robustness of structural systems - a new focus for the joint committee on structural safety. In: *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*. London. Taylor & Francis Group. 2007. P. 1–8.

27. Dusenberry D.O., Hamburger R.O. Practical means for energy-based analyses of disproportionate collapse potential. *J. Perform. Constr. Fac.* 2006. Vol. 20. No 4. P. 336–348. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:4(336).

28. SP 20.13330.2016. *Nagruzki i vozdeystviya [Loads and Impacts]*. Moscow. Minregion Rossii Publ. 2016. 105 p. (In Russian).

29. Sabatka L., Wald F., Kabelae J. et al. Structural analysis and design of steel connections using component-based finite element model. *Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2015. Vol. 9. P. 895–901. DOI: 10.17265/1934-7359/2015.08.002.

EVALUATION OF THE VITALITY OF A FLANGED CONNECTION WITH A STEEL TOWER STRUCTURE WITH ACCOUNT OF EXPERIMENTAL DETERMINATION OF AERO-DYNAMIC COEFFICIENTS

Erofeev V.I.¹, Samokhvalov I.A.^{2,3}

¹*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences – Branch of Federal Research Center “Institute of Applied Physics of the RAS”,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

²*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

³*Nizhny Novgorod State University of Architecture, Building and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

A numerical study of the survivability of the flange assembly is carried out upon reaching a critical load and in the presence of a defect in one of the design areas, taking into account the calculated values of the aerodynamic coefficients. An experiment is being carried out to determine the values of the wind load acting on the supporting legs of a metal tower. The calculation of the stress-strain state is performed using software system as SCAD Office and IDEA StatiCa 10.0. After calculating the forces in the core model of the structure, a three-dimensional plate model of the assembly is formed and prepared for calculation.

According to the results of the experiment, a graph was compiled with the values of aerodynamic coefficients, which were used in calculating the stress-strain state of the node. The analysis of the calculation results revealed that in the design (defect-free) state of the structure, the safety factor of the bearing units and elements is 35–40% (equivalent stresses were 165 MPa). If there is a defect in the metal structures of the belt in the region of the flange, the equivalent stresses increase to 247.6 MPa in the region of the cleavage (defective hole), thus, the margin in bearing capacity drops to 0.4%. As a result of the assessment of the survivability of the flange connection, it was revealed that the connection has a high potential survivability, in turn, the flange itself is able to work in the presence of some defects without reducing its bearing capacity to a critical level.

The aerodynamic coefficients obtained in this work will determine the wind load on this type of profile and can be used in design calculations of tower structures for wind loads.

Keywords: survivability, aerodynamic coefficient, aerodynamic installation, failure analysis, finite element method, average and pulsation pressure characteristics.