

УДК 69.059.4

Лукашенко Виктор Иванович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: vil_06_4444@mail.ru

Абдуллин Фаннур Фаридович

студент

E-mail: fannur.ru@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Ахметзянов Рустем Илдарович

инженер

E-mail: Nrustem@bk.ru

ООО «Татгражданпроект»

Адрес организации: 420140, Россия, г. Казань, ул. Ю. Фучика, д. 98А

Постановка задачи определения ресурса отдельных элементов и всей конструкции при действии случайных ветровых нагрузок

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – определение ресурса, как отдельных элементов, так и всей конструкции при различном распределении прочности её элементов и действии случайных ветровых нагрузок.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в том, что в отличие от односторонней оценки значений случайных величин нагруженности при определении резерва прочности при повторных статических нагрузках в случае ветровых нагрузок для обеспечения заданного уровня надежности необходима двусторонняя интервальная оценка случайных частот многоциклового (динамического) нагружения. В работе представлен общий алгоритм расчета минимального ресурса элемента и сооружения в целом, при различном распределении прочности ее элементов

Вывод. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что по разработанному алгоритму решения задачи, изменение резерва прочности элементов и конструкции в целом при многоцикловом нагружении моделируется достоверно, обеспечивая возможность определения ресурса конструкции и реального времени ее работы.

Ключевые слова: собственные колебания, случайные величины, ресурс, ветровая нагрузка, резерв прочности, многоцикловая усталость, надежность.

Введение

В работах Лукашенко В.И., Минсагирова М.Ф., Ахметзянова Р.И. «Определение ресурса статически определимой системы при заданных параметрах случайных величин» приводятся методы и алгоритмы приближенного анализа прочности и ресурса элементов конструкций, использующие теорию расчета строительных конструкций на надежность [1]. Программы для анализа резерва прочности в условиях повторных случайных статических нагрузок и случайных параметров несущей способности элементов, с заданным нормальным законом распределения в интервалах, позволяют моделировать с заданной вероятностью стационарный случайный процесс усталостного сокращения резерва прочности. Для предварительной оценки ресурса в условиях проектирования такой подход позволяет с достаточной точностью прогнозировать минимальное его значение при невыгоднейших условиях эксплуатации и отказа с заданной вероятностью хотя бы одного из элементов конструкции [2].

В отличие от односторонней оценки значений случайных величин нагруженности при определении резерва прочности при повторных статических нагрузках в случае ветровых нагрузок для обеспечения заданного уровня надежности необходима двусторонняя интервальная оценка случайных частот многоциклового (динамического) нагружения.

При действии случайных ветровых нагрузок вынужденные колебания сооружений, связанные с вихреобразованием при обтекании их воздушным потоком, могут привести к резонансным явлениям. Отстройка динамической реакции по основным формам собственных колебаний в этом случае может осуществляться выполнением условия непопадания частот этих форм в определенный интервал частот вихрей дорожек Кармана.

Для быстровозводимых многократно используемых конструкций снижение несущей способности даже при сохранении характеристик их динамических жесткостей необходимо учитывать двустороннее уменьшение резерва прочности.

В данной работе предлагаемый метод определения характеристик случайной величины резерва прочности отдельных элементов конструкций при двусторонних толерантных оценках предлагается использовать в условиях как малоциклового (статического), так и многоциклового (динамического) нагружения для решения задач определения ресурса, как отдельных элементов, так и всей конструкции при различном распределении прочности её элементов.

Описание расчетной модели и алгоритм

За исходную модель было принято сооружение (смотровая трибуна) высотой 19 м. Периметр сооружения 19×46 м, которая состоит из двух частей, из самой трибуны и навеса. Система является модульной и состоит из следующих основных элементов: винтовых домкратов, стоек, ригелей, диагоналей и настила. Стойки, ригели и диагонали выполнены из трубы диаметром 48,3 мм и толщиной стенки 3,2 мм (рис. 1). Такое сооружение не требует фундамента и может монтироваться, например, на деревянные подкладки [5, 7, 9].

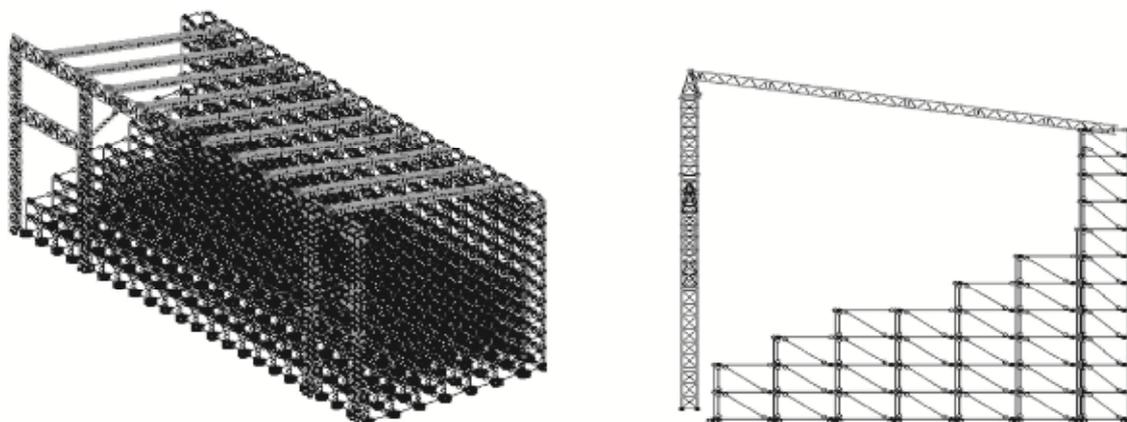


Рис. 1. Исходная схема

Учитывая, что податливость элементов покрытия гораздо больше податливости основного сооружения, то формы соответствующие названным частотам в основном соответствуют элементам покрытия. Ниже приводятся фрагменты элементов покрытия (рис. 2).



Рис. 2. Формы собственных колебаний

Находясь под разными видами нагрузок и воздействий, система имеет разные формы собственных колебаний, в нашей работе мы рассмотрим три из них. Расчет частот собственных колебаний данной системы производился в программном комплексе ПК Лира-Сапр 2013. В табл. 1 приведены результаты расчета частот собственных колебаний конструкции.

Таблица 1

Частоты собственных колебаний конструкции

№ формы	Круговая частота (рад/сек)	Частота (Гц)	Период (с)	Коэф. распредел.	Мод. масса(%)	Сумма мод. масс (%)
1	3,442	0,547	1,825	0,207	0,0393	0,0393
2	3,613	0,575	1,738	0,205	0,0388	0,0781
3	3,393	0,587	1,701	0,211	0,0408	0,1191

Предполагаемый алгоритм действий:

- 1) Методом статистического моделирования исследовать вероятностные характеристики скоростей ветра;
- 2) Определить собственные частоты колебаний конструкции. Модальный анализ;
- 3) Определить диапазон частот вихревых воздействий и их вероятностные характеристики с надежностью 0,99 т. е. произвести вероятностный анализ;
- 4) Определить статические, квазистатические и пульсационное воздействие ветра;
- 5) Построить динамические реакции по основным формам собственных колебаний и проверить на резонанс;
- 6) Определить резерв прочности элементов конструкции от всех загружений ;
- 7) Определить ресурс при $N=10^7$ (многоцикловой) нагруженности от повторных ветровых нагрузок.

Также существуют и другие методы решения подобных задач определения минимального возможного ресурса, например работа [6].

Моделирование случайных величин

Рассматривались две случайные величины: частоты собственных колебаний сооружения, и частоты образования вихрей от ветровых воздействий, которые определяются случайным характером ветровых нагрузок. Были найдены диапазоны скоростей ветра (рис. 3) для конкретных условий (для г. Казани) и диапазоны частот собственных колебаний трех первых форм [3]. С использованием статистического моделирования нормального равномерного распределения случайных величин были определены характеристики этих величин: дисперсия, математическое ожидание, стандарт и доверительный интервал с вероятностью 0,99.

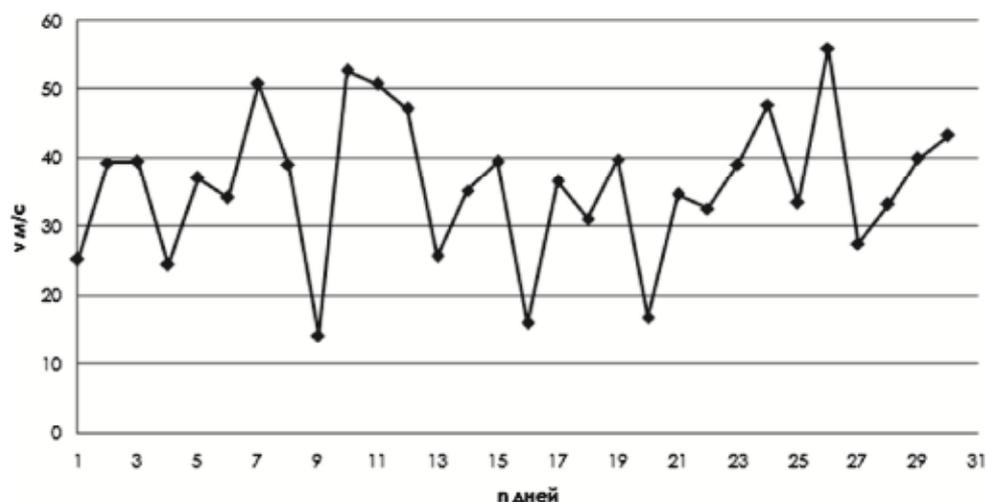


Рис. 3. График изменения скорости ветра в течение 1 месяца

От обтекания сооружения ветровым потоком, образуется дорожка Кармана, которая создает периодическое нагружение сооружения при срыве вихрей. Для определения частоты этих нагружений, необходимо определить число Re (Рейнольдса), а далее, связанное с ним безразмерный критерий Sh (число Струхалия) [4]:

$$R_e = \frac{\rho n d}{\mu_0}, \quad (1)$$

где $\rho=1,293 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха;

$v=5-60 \text{ м/с}$ – характерная скорость потока;

$d=1,3-46 \text{ м}$ – характерный размер, зависящий от направления потока;

$\mu_0=1,83 \times 10^{-3} \text{ Па}$ – вязкость воздуха.

Частоту срыва вихрей, число Струхалия и число Рейнольдса находим при скорости ветра 5-60 м/с. $Re=0,459 \times 10^4-5,51 \times 10^4$ при 1,3 м, $Re=1,625 \times 10^5-9,5 \times 10^5$ при 46 м.

Исходя из значений числа Рейнольдса по графику зависимости этих чисел, определяем, что число Струхалия равняется $Sh=0,2$. Зная это значение, мы можем определить частоту срыва вихрей, воспользовавшись следующей формулой:

$$f=Shv/d, \quad (2)$$

где n – скорость ветра, м/с;

d – ширина соприкосновения потока ветра и сооружения, м;

Sh – число Струхалия.

$f=(4,148-5,486) \text{ Гц}$ для $d=1,3 \text{ м}$, и $f=(0,123-0,163) \text{ Гц}$ для $d=46 \text{ м}$, при доверительном интервале скоростей ветра (28,378-37,537) м/с.

В настоящее время нормативные и расчетные значения ветровой нагрузки необходимы для теоретического обеспечения надежности конструкций по методу предельных состояний. Действующими нормами допускается производить также расчет по заданному значению надежности вероятностными методами при наличии достаточных данных об изменчивости основных факторов, входящих в расчетные зависимости [10].

Учитывая неполноту данных о характере воздействия и самих ветровых нагрузках на этапе проектирования, для предварительной оценки минимального ресурса, мы используем методику СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия». С помощью специальной расчетной программы в Excel «Динамический расчет на ветровую нагрузку» (разработанной Ахметзяновым Р. И.) производим расчет на случайную ветровую квазистатическую нагрузку на элемент. Вводя исходные данные о сооружении, отстраиваем динамическую реакцию и определяем коэффициенты динамичности.

Основными характеристиками ветровой нагрузки является плотность воздуха ρ и скорость ветра n . Это следует из закона Бернулли, которое применяется для определения статической составляющей давления ветра [8]:

$$w = \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3)$$

где n – средняя скорость ветра (м/сек).

При $\rho=1,293 \text{ кг/м}^3$ определяется нормативное значение ветрового давления по СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия»:

$$w_0=0,43v^2, \quad (4)$$

где n – скорость ветра, соответствующая 10-ти минутному интервалу осреднения и превышаемая в среднем один раз в 50 лет. Коэффициент 0,43 учитывает разную обеспеченность ветрового давления и скорости ветра.

В нашем случае диапазон скоростей ветра определяется следующим образом:

$$v=v_0 \pm \beta \sigma, \quad (5)$$

где v_0 – математическое ожидание скорости ветра;

β – характеристика безопасности;

σ – стандартное отклонение для скорости ветра.

С другой стороны, согласно СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия», средняя ветровая нагрузка определяется формулой:

$$w_m=w_0K(z)c, \quad (6)$$

где w_0 – нормативное значение ветрового давления, зависящее от ветрового района;

$K=f(z)$ – коэффициент высоты, зависящий от типа местности;

c – аэродинамический коэффициент давления ветра.

Также, нормативная величина пульсационной составляющей ветровой нагрузки определяется как некоторая доля от среднего значения:

$$w_p = w_m \zeta(z_e) v \mu, \tag{7}$$

где v – коэффициент корреляции пульсаций;

$\zeta(z_e)$ – коэффициент пульсаций давления ветра;

μ – коэффициент динамичности, значение которого приводится в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты динамичности колебаний конструкции

$v, \text{Гц}$	μ_1	μ_2	μ_3	μ
0,110	1,042	1,038	1,036	1,042
0,219	1,191	1,170	1,162	1,191
0,329	1,564	1,487	1,456	1,564
0,439	2,797	2,395	2,257	2,787
0,549	62,144	10,996	7,673	62,144

По полученным результатам можно сказать, что скачок проявляется при первой форме собственных колебаний, где значение коэффициента динамичности самое высокое (рис. 4).

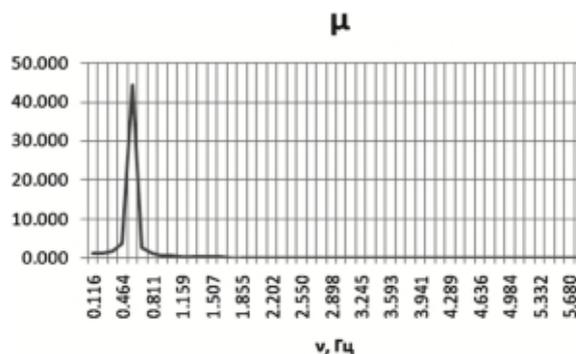


Рис. 4. График зависимости коэффициента динамичности от частоты образования вихрей

По первой частоте коэффициент получился самым большим, тем самым можно прогнозировать, что резонансное явление проявится по этой форме собственных колебаний. Таким образом, в заданном диапазоне возникает одна резонансная частота, которую мы видим на графике зависимости коэффициента динамичности от частоты срыва вихрей и далее считаем ресурс по данной частоте. По этой же программе, мы определяем максимальную квазистатическую ветровую нагрузку на элементы конструкции, и далее зная остальные нагрузки и несущую способность из детерминированного расчета, определяем резерв прочности элементов конструкции.

Далее, используя методы и алгоритмы приближенного анализа прочности и ресурса элементов конструкций, приведенные в работе Лукашенко В.И., Минсагирова М.Ф., Ахметзянова Р.И. «Определение ресурса статически определимой системы при заданных параметрах случайных величин», определяем характеристики случайной величины резерва прочности отдельных элементов конструкций, при двусторонних толерантных оценках.

Исходные данные взяты из расчета на ПК Лира-Сапр 2013 на ветровую нагрузку с учетом случайных характеристик ветрового давления, пульсаций ветра и случайной характеристики материала (стали) максимально нагруженных элементов. Проведя анализ числа опасных сечений из максимально нагруженных, выделяем 18 самых нагруженных элементов конструкции. В табл. 3-4 приведены исходные данные для этих элементов.

Таблица 3

Для внутренних силовых факторов

$N_{\text{раст}}$	$N_{\text{сж}}$	$\sigma N_{\text{раст}}$	$\sigma N_{\text{сж}}$	$VN_{\text{раст}}$	$VN_{\text{сж}}$
64,44	441,57	6,8	47,9	0,1055245	0,10848

Таблица 4

Для несущей способности

$N_{раст}$	$N_{сж}$	$\sigma N_{раст}$	$\sigma N_{сж}$	$VN_{раст}$	$VN_{сж}$	$k_0 N_{раст}$	$k_0 N_{сж}$
264,68	748,64	28,9	69,8	0,1091885	0,09324	0,74603	0,783134

Дальнейшие расчеты ресурса проводим как определение числа повторных нагружений до истощения полученного резерва прочности с заданной надёжностью. Для невыгоднейшего сочетания постоянной и временных нагрузок в условиях повторных нагружений определяем и строим графики резерва прочности по табл. 5 (рис. 5) при повторении нагрузки от $lgN = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ (многоциклового усталости) при несущей способности: $N_{раст}=264,68$ кН (м. о.) и $N_{сж} = 748,64$ кН (м. о.)

Таблица 5

Резерв прочности

$lg(N)$	0	1	2	3	4	5	6	7
$SN_{сж}$	198	197,27	196,66	196,14	195,67	195,24	194,84	194,47
$SN_{раст}$	291,31	286,14	281,88	278,18	274,87	271,85	269,05	266,44

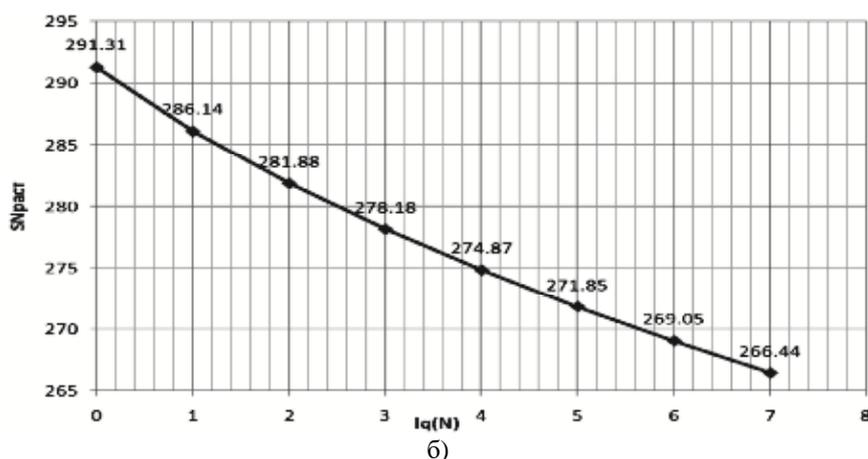
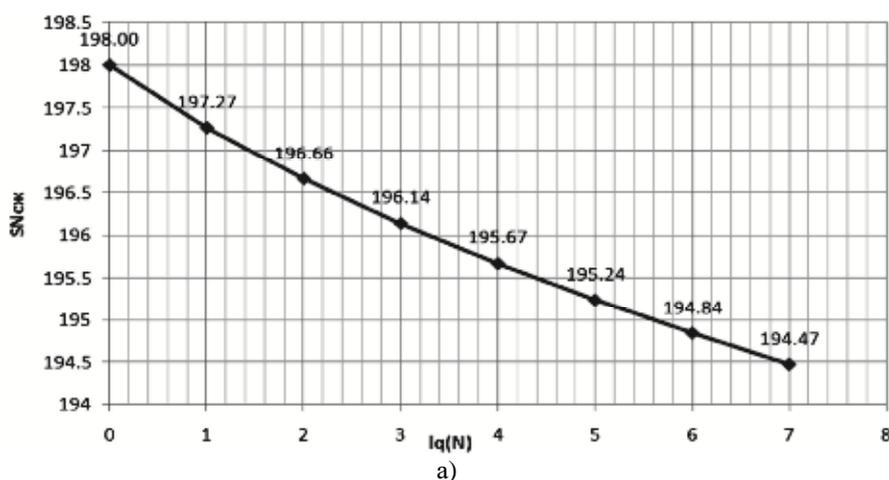


Рис. 5. Графики резерва прочности: а – для сжатых элементов; б – для растянутых элементов

Как видно из рис. 5, резерв прочности элементов конструкции не исчерпывается при $N=10^7$ повторений, тем самым означает, что при однократном цикле ($N=1$) приложении нагрузки (со статистикой $n=30$ нормального распределения по Гауссу) с вероятностью 0,99 разрушения не будет. Строим номограммы резерва прочности по табл. 6 (рис. 6) для значений полученных выше с учетом изменения предельной несущей способности для $ns=1$ и $ns=18$.

Таблица 6

Область номограмм резерва прочности

lq(N)	0	1	2	3	4	5	6	7
SN _{сж} , ns=1	198	197,27	196,66	196,14	195,6692	195,24	194,843	194,4719
SN _{сж} , ns=18	194,98	194,24	193,64	193,12	192,6457	192,22	191,82	191,4485
SN _{раст} , ns=1	291,31	286,14	281,88	278,18	274,8728	271,85	269,054	266,4391
SN _{раст} , ns=18	270,02	264,84	260,58	256,88	253,5751	250,55	247,756	245,1413

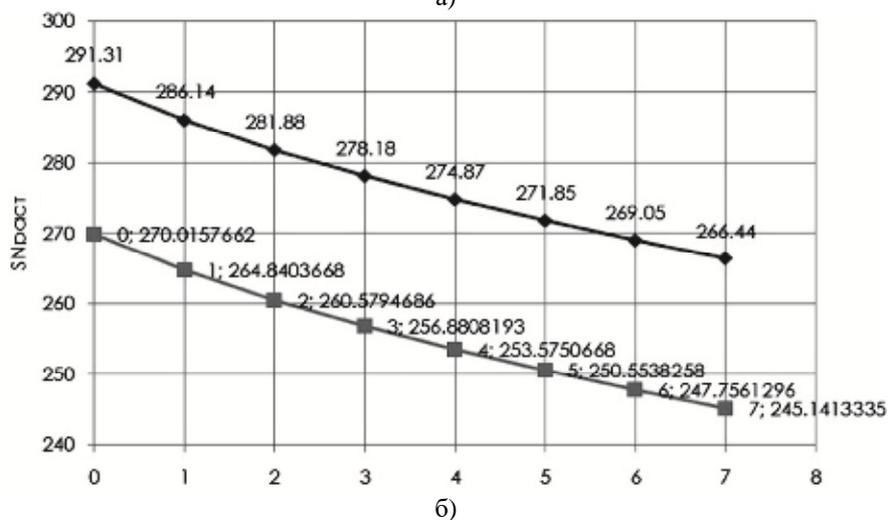
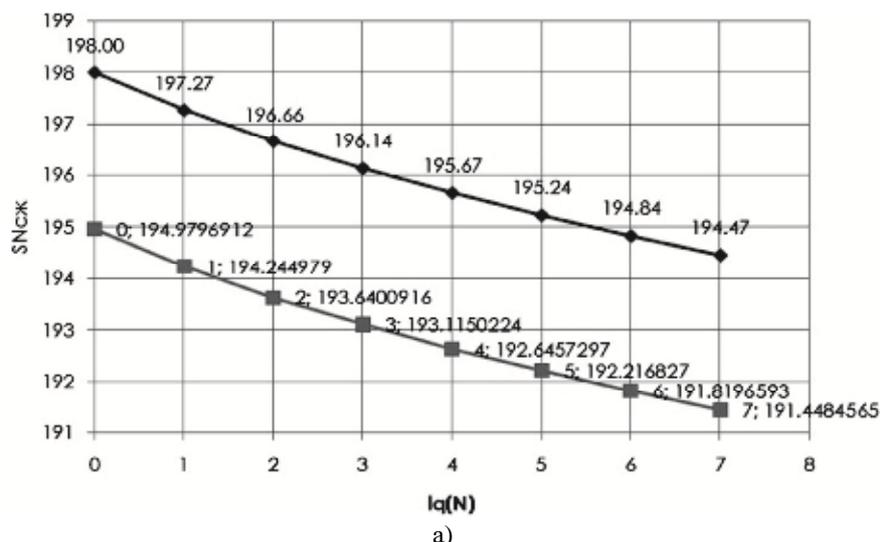


Рис. 6. Области номограмм резерва прочности при ns=1 и ns=18:
 а – для сжатых элементов; б – для растянутых элементов

Заключение

Можно сказать, что резерв прочности этого элемента и конструкции в целом не исчерпывается. По результатам исследования максимально сжатых и максимально растянутых элементов покрытия, резерв прочности не исчерпывается при N=10⁷. Учитывая частоту и зная период можно определить реальное время работы конструкции, которая равняется $T_{pec} = \frac{1}{f} \cdot 10^7 = \frac{1}{0,547} \cdot 10^7 = 18281535,649 \text{сек}$. Чтобы выяснить сколько это время составляет в годах $\frac{T_{pec}}{365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60} = \frac{18281535,649}{31536000} = 0,5820д$ т.е. примерно 210 дней, что вполне достаточно для таких временных сооружений.

Список библиографических ссылок

1. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М. : Стройиздат, 1978. 240 с.
2. Болотин В. В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М. : АН СССР, 1977. С. 86–93.
3. Куприянов В. Н., Альтапов С. Р. Моделирование ветровых воздействий изменением формы здания // Известия КГАСУ. 2016. № 2 (36). С. 100–104.
4. Лукашенко В. И., Барханов А. И., Вафина Д. А. Анализ эффективности применения КТП для отстройки колебаний высотных зданий при действии ветровых нагрузок // Известия КГАСУ. 2015. № 2 (32). С. 161–167.
5. Хайдаров Л. И., Шмелев Г.Н., Зиятдинов Э.К. Построение расчетных схем мобильных пространственных стержневых конструкций, моделирующих их действительную работу // Известия КГАСУ. 2017. № 2 (40). С. 139–145.
6. Уткин В. С., Плотникова О. С. Оценка надежности конструкций при неполной статистической информации // Вестник НовГУ. 2005. № 34. С. 118–121.
7. Antoniou N., Nikolaidis Th., Baniotopoulou S. C. Designing long-span steel girders by applying displacement control concepts // Engineering Structures. 2014. Vol. 59. February. P. 21–27.
8. Davenport A. G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds // Journal of the Royal Meteorological Society. 1961. Vol. 87. April. P. 194–214.
9. Kowal Z. The formation of space bar structures supported by the system reliability theory // Archives of civil and mechanical engineering. 2011. Vol. 11. P. 115–133.
10. Шмелев Г. Д., Головина Н. В. Прогнозирование надежности и остаточного ресурса строительных конструкций с использованием метода линеаризации в условиях ограниченной статистической информации : сб. трудов международной научно-практической конференции – Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании – 2012 / Куприянов. Одесса, 2012. С. 100–107.

Lukashenko Viktor Ivanovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: vil_06_4444@mail.ru

Abdullin Fannur Faridovich

student

E-mail: fannur.ru@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Ahmetzyanov Rustem Ildarovich

engineer

E-mail: Nrustem@bk.ru

LTD «Tatgrazhdanproekt»

The organization address: 420140, Russia, Kazan, Y. Fuchika st., 98A

Statement of the task of determining the resource of individual elements and the entire structure under the action of random wind loads**Abstract**

Problem statement. The aim of the study is to identify the resource as separate elements and the whole structure depending on the different distribution of the strength of its elements.

Results. The main results of the study are that in contrast to the unilateral evaluation of the values of the random variable loading in the determination of reserve of strength under repeated static loads in the case of wind loads to ensure a specified level of reliability required bilateral interval estimation of random frequency multi-cycle (dynamic) loading. The paper presents a General algorithm for calculating the minimum resource element of steel structures and structures in General, depending on the different distribution of the strength of its elements

Conclusions. The significance of the obtained results for the construction industry is that, based on the developed algorithm for solving the problem, the change in the strength reserve of elements and the structure as a whole under multi-cycle loading is modeled reliably, providing the ability to determine the design resource and the real time of its operation.

Keywords: vibrations, random variable, resource, wind load, reserves of strength, high cycle fatigue and reliability.

References

1. Rzhantsyn A. R. Theory of design of structures for reliability. M. : Stroizdat, 1978. 240 p.
2. Bolotin V. V. Methods of probability theory and reliability theory in calculations of structures. M. : AN SSSR, 1977. P. 86–93.
3. Kupriyanov V. N., Altapov S. R. Modeling of wind actions by changing of a form of the building // *Izvestiya KGASU*. 2016. № 2 (36). P. 100–104.
4. Lukashenko V. I., Barkhanov A. I., Vafina D. A. Effectiveness analysis of STO application for frequency spectrum adjustment of high rise building under the wind loads // *Izvestiya KGASU*. 2015. № 2 (32). P. 161–167.
5. Khaidarov L. I., Shmelev G. N., Ziyatdinov E. K. Construction of computational schemes of mobile spatial bar structures modeling their actual work // *Izvestiya KGASU*. 2017. № 2 (40). P. 139–145.
6. Utkin V. S., Plotnikova O. S. Estimation of the reliability of structures with incomplete statistical information // *Vestnik NovGU*. 2005. № 34. P. 118–121.
7. Antoniou N., Nikolaidis Th., Baniotopoulou C. C. Designing long-span steel girders by applying displacement control concepts // *Engineering Structures*. 2014. Vol. 59. February. P. 21–27.
8. Davenport A. G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds // *Journal of the Royal Meteorological Society*. 1961. Vol. 87. April. P. 194–214.
9. Kowal Z. The formation of space bar structures supported by the system reliability theory // *Archives of civil and mechanical engineering*. 2011. Vol. 11. P. 115–133.
10. Shmelev G. D., Golovina N. V. Prediction maintainability and remaining life of building constructions using a method of linearization in conditions of limited of statistical information : dig. of art. of the international scientific and technical conference – Modern problems and their solutions in the science, transportation, manufacturing and education – 2012 / Kupriyenko. Odessa, 2012. P. 100–107.