

УДК 624(075.8)

А.З. Манапов – кандидат технических наук, доцент

Т.А. Зиннуров – аспирант

E-mail: man48-75@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

**АЛГОРИТМЫ МЕТОДА МОНТЕ-КАРЛО
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ НА СООРУЖЕНИЯ**

АННОТАЦИЯ

Показана возможность статистического моделирования ветровой нагрузки при помощи основных законов распределения вероятностей. Ветровая нагрузка генерируется множеством случайных чисел, зависящих от функции распределения вероятности. Статистической базой для моделирования ветровой нагрузки являются данные метеонаблюдений по движению воздушных масс метеостанции Казань-«Опорная» за 58 лет.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод Монте-Карло, вероятность, распределение, статистический, моделирование, ветровой напор, прогноз.

A.Z. Manapov – candidate of technical sciences, associate professor

T.A. Zinnurov – post-graduate student

Kazan State University of Architecture and Engineering

**ALGORITHMS OF MONTE-CARLO METHOD
IN WIND ACTION SIMULATION ON STRUCTURE**

ABSTRACT

The opportunity of wind loading statistical modeling by means of probabilities distribution main laws is presented. Wind loading is generated by random numbers depending on function of probability distribution. The statistical information for wind loading modeling is accepted from Kazan – “Basic” meteorological station observations on movement of air weights for 58 years.

KEYWORDS: Monte-Carlo method, probability, distribution, statistical, simulation, wind head, forecast.

В статье предложены и протестированы алгоритмы метода Монте-Карло для моделирования параметров ветровой нагрузки на строительные сооружения. Статистической базой для моделирования ветровой нагрузки являются данные метеонаблюдений по движению воздушных масс метеостанции Казань-«Опорная» за 58 лет (1936-2004 гг.), используется также информация об ураганах 8 июля 2007 г. и 23 июня 2008 г.

По данным метеонаблюдений, на территории г. Казани преобладает слабый ветер со скоростью 3.1-4.5 м/с. В редких случаях для данной территории наблюдается появление сильных ветров скоростью выше 14 м/с. Среднее количество дней с сильным ветром составляет 10, наибольшее количество дней – 22 дня. Среднее число дней с наблюдаемым превышением скорости ветра 8 м/с составляет 89 дней, 15 м/с – 9 дней.

Таблица 1

Средняя месячная и годовая скорость ветра (м/с)

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
4.4	4.2	4.2	3.9	3.4	4.0	3.1	3.2	3.6	4.3	4.4	4.5	3.9

Таблица 2

Максимальная скорость ветра и порывов ветра (м/с)

Характеристика ветра	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Скорость макс.	20	24	20	28	17	17	15	16	18	20	20	20	24
Порыв	20	26	24	20	20	25	20	19	24	28	28	24	28

Таблица 3

Повторяемость (%) различных градаций скорости ветра

Скорость ветра (м/с)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
0-1	27.1	30.5	31.4	27.4	30.4	34.5	39.7	37.7	34.5	24.1	22.1	26.4	30.5
2-3	21.7	23.7	25.8	25.6	27.0	29.3	28.0	28.9	26.0	25.0	27.1	23.0	26.0
4-5	24.2	22.5	20.4	26.0	23.8	23.1	21.2	22.5	24.0	24.9	24.2	25.0	23.5
6-7	14.2	12.5	12.6	13.5	12.8	9.5	8.0	8.4	10.7	15.5	14.9	14.8	12.3
8-9	10.8	8.6	7.9	6.2	5.6	3.1	2.9	2.4	4.0	8.2	10.0	8.5	6.5
10-11	1.2	1.0	0.8	0.5	0.4	0.2	0.2	0.1	0.3	1.3	1.0	1.3	0.7
12-13	0.5	1.1	0.6	0.4	-	0.2	-	-	0.5	0.8	0.5	0.6	0.4
14-15	0.2	0.1	0.3	0.3	-	0.1	-	-	-	0.1	0.1	0.4	0.1
16-17	0.1	-	0.2	0.1	-	-	-	-	-	0.1	0.1	-	0.0
18-21	0.0	0.0	0.2	0.0	-	-	-	-	-	0.0	0.0	-	0.0
22-25	-	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.0

Таблица 4

Среднее число дней с сильным ветром

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
1.3	0.6	1.1	0.3	1.5	1.3	0.7	0.5	0.5	0.7	0.6	0.8	10

В зимние, осенние и весенние месяцы, в основном, дуют ветры южной четверти с повторяемостью 49-56 %. В летние месяцы преобладают ветры северо-западного направления с повторяемостью в 44-47 %.

Таблица 5

Повторяемость (%) различных направлений ветра

Напр.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
С	8	8	9	9	13	14	15	14	12	11	6	5	10
СВ	5	7	6	8	11	10	10	9	5	5	4	3	7
В	5	8	8	9	9	10	11	10	8	4	5	5	8
ЮВ	15	16	16	13	9	11	10	9	11	8	11	15	12
Ю	27	24	27	23	14	15	12	13	16	19	26	31	21
ЮЗ	13	11	11	13	10	9	8	9	12	16	19	16	12
З	16	17	13	14	18	15	16	18	19	20	19	16	17
СЗ	10	10	6	8	13	15	14	15	14	16	9	8	12
штиль	11	12	15	11	13	14	19	17	14	11	9	9	13

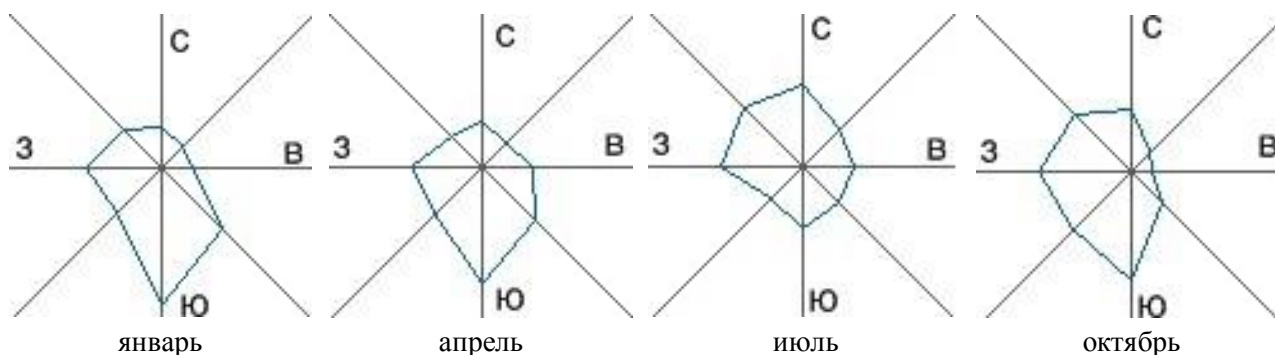


Рис. 1. Роза ветров, построенная по данным таблицы 5

Ученые NASA утверждают, что, начиная с середины 90-х годов, произошёл скачок интенсивности ураганов, что потребовало пересмотреть шкалу классификации ураганов (F1-F4), добавляя F5, F6, F7. Ученые отмечают появление ураганов в тех местах, где их не было на протяжении нескольких веков [1].

Так, на территории г. Казани 8 июля 2007 г. были зафиксированы сильные шквалистые ветры. По данным Министерства по делам гражданской обороны и чрезвычайным ситуациям Республики Татарстан, средняя скорость при этом достигала 28-30 м/с. Этот ветер можно оценить как штормовой, переходящий в ураган. Такой силы ветер в г. Казани был зафиксирован впервые. Направление передвижения воздушных масс было зафиксировано со спутника. С 7.00 до 19.00 часов ветер имел западное направление, около 19.00 часов ветер неожиданно сменил направление на юго-западное с образованием ветра ураганной силы (рис. 2).

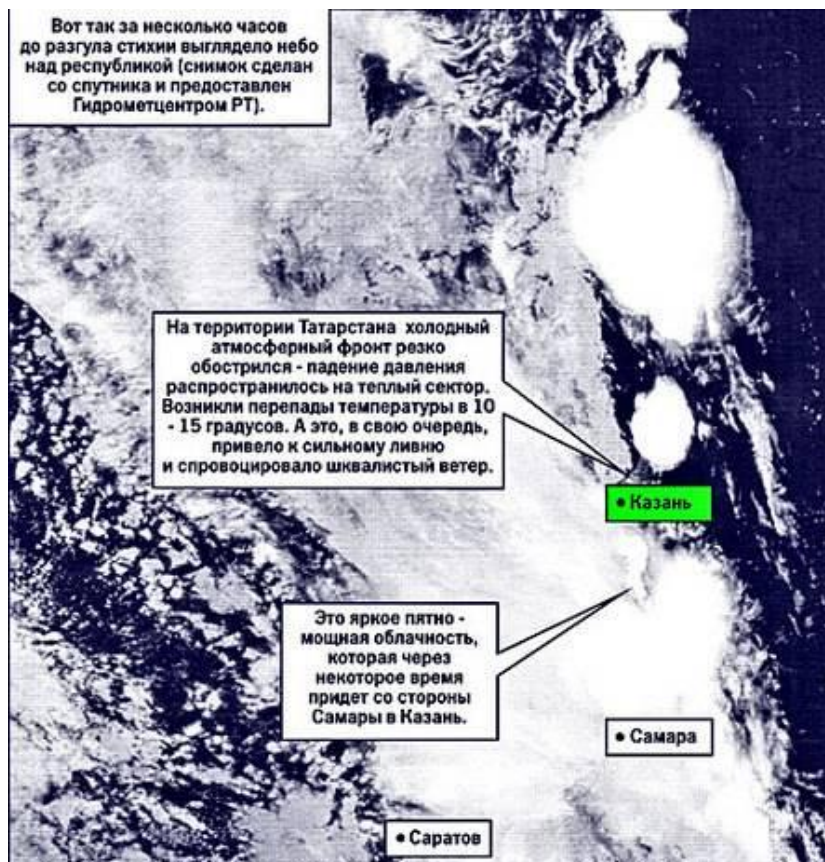


Рис. 2. Движение облачности и воздушных масс во время урагана 8 июля 2007 г.

Большие разрушения получили населенные пункты в районе г. Казани и поселка Лаишево, были снесены крыши домов, легкие строения, разрушены рекламные щиты, повалены деревья. Разрушения носили концентрированный характер. В лесных массивах проглядывались круговые участки диаметром несколько десятков метров, с поваленными или сломанными деревьями, что позволяет предположить о возникновении в очаге урагана смерчей. Есть версия, что ураган усилил свою силу, проходя через Куйбышевское водохранилище.

Статистическое моделирование ветровой нагрузки реализовано двумя методами. Первый метод предполагает использование нормальной функции распределения годовых максимумов ветрового давления с последующим моделированием текущих значений ветрового давления с интервалом 10 минут в течение года [2]. Второй метод моделирует непосредственно текущие значения ветрового давления с интервалом 10 минут с использованием функции распределения Вейбулла [3, 4].

Выполним статистическое моделирование ветрового давления первым методом, с использованием нормального асимптотического распределения в соответствии с данными пособия [2], со средним значением максимального годового давления ветра $\bar{w}_o = 27 \text{ кг/м}^2$ и коэффициентом вариации $k_v = 0.37$. Полученное по этим данным с помощью генератора случайных чисел множество значений годовых максимумов ветрового давления за 100 лет представлено на гистограмме (рис. 3).

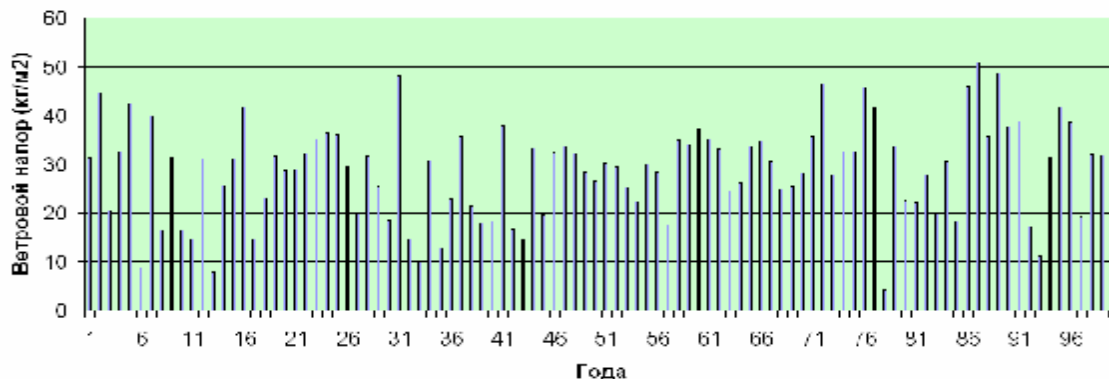


Рис. 3. Реализации годовых максимумов напора ветра

Как видно из гистограммы, минимальное значение годовых максимумов ветровой нагрузки составляет 4 кг/м^2 (8 м/с), а максимальное – 51 кг/м^2 ($28,6 \text{ м/с}$). Результаты моделирования неадекватны статистическим данным метеонаблюдений. По данным метеонаблюдений, минимальное значение годовых максимумов скорости ветра составляет 14 м/с ($12,2 \text{ кг/м}^2$), максимальное, при порывах – 35 м/с ($76,6 \text{ кг/м}^2$). С учетом этих фактов выполнена корректировка нормального асимптотического распределения с преобразованием в усеченное распределение (рис. 4). При этом нижний предел возможных значений принят равным $a=12,2 \text{ кгс/м}^2$, верхний предел $b=76,6 \text{ кгс/м}^2$.

$$\varphi(x) = \frac{1}{9,99\sqrt{2p}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-27}{9,99}\right)^2\right] \quad (1)$$

$$\begin{cases} \varphi_y(x) = 0, & \text{при } x < a \text{ и } x > b; \\ \varphi_y(x) = \frac{\varphi(x) - \Psi(x)}{1 - a}, & \text{при } a \leq x \leq b, \end{cases} \quad (2)$$

$$\Psi(x) = \frac{(x-a)[\varphi(b) - \varphi(a)]}{b-a} + \varphi(a); \quad a = \int_{-\infty}^a \varphi(x) dx + \int_b^{\infty} \varphi(x) dx + \frac{\{\varphi(a) + \varphi(b)\}}{2}(b-a).$$

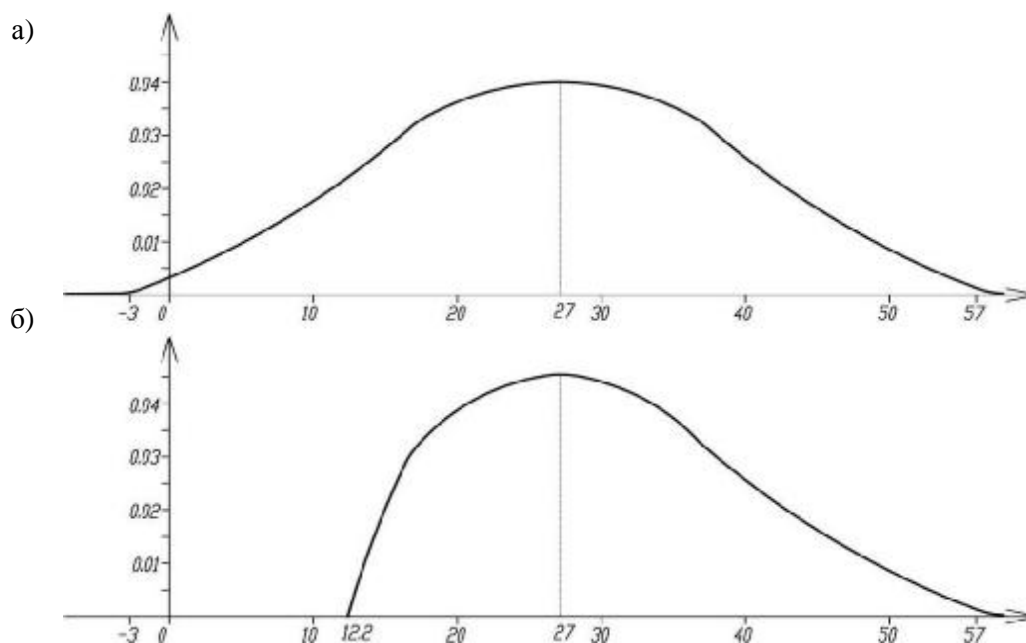


Рис. 4. Асимптотическое (а) и усеченное несимметричное (б) распределение годовых максимумов ветрового давления

Полученные с использованием усеченного распределения реализации годовых максимумов ветрового давления приведены на гистограмме на рис. 5.

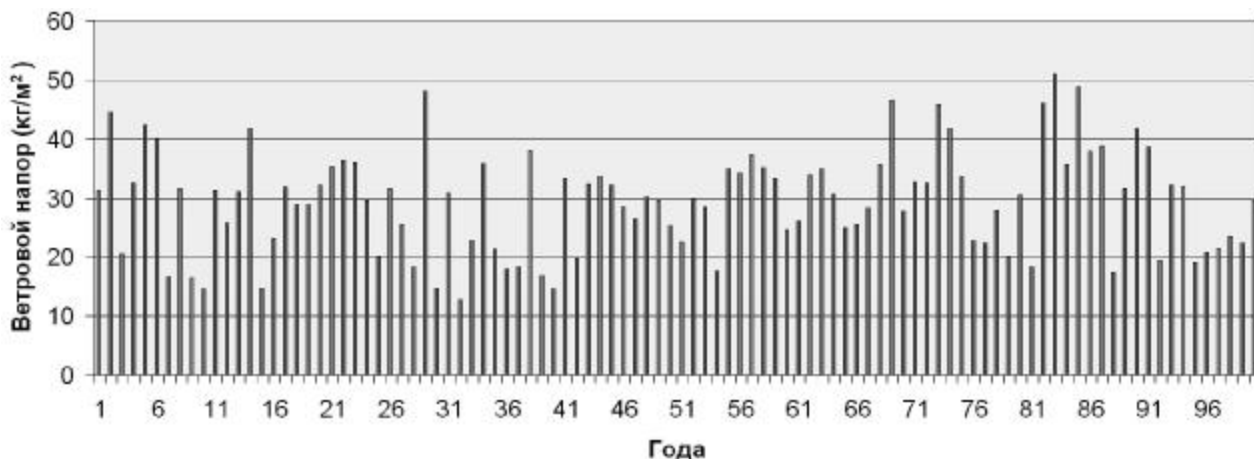


Рис. 5. Реализации годовых максимумов при использовании усеченного распределения

Для решения задачи моделирования ветрового напора в течение года с интервалом 10 минут были использованы статистические данные, представленные в таблице 3. На рис. 6 приведено графическое представление этих данных. Для решения задачи составлена программа в расчетном комплексе MathCAD (рис. 7). В соответствии с этой программой год разделен на 52560 интервалов по 10 минут каждый. На каждом интервале времени при помощи генератора случайных чисел определяется значение ветрового напора с учетом распределения, представленного в таблице 3. Результаты моделирования ветрового напора с интервалом 10 минут в течение года приведены на рис. 8. Годовой максимум ветрового напора для этого года составлял 28 кгс/м^2 , в то время как абсолютный максимум за 100 лет был равен $55,4 \text{ кгс/м}^2$.

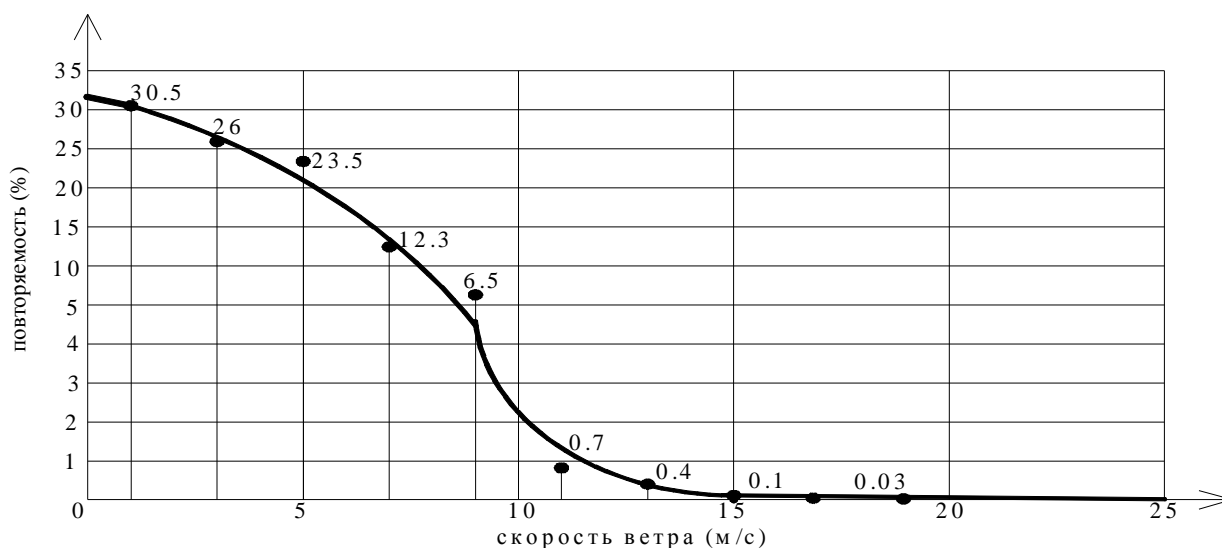


Рис. 6. Повторяемость (в %) различных градаций скорости ветра в г. Казани за год

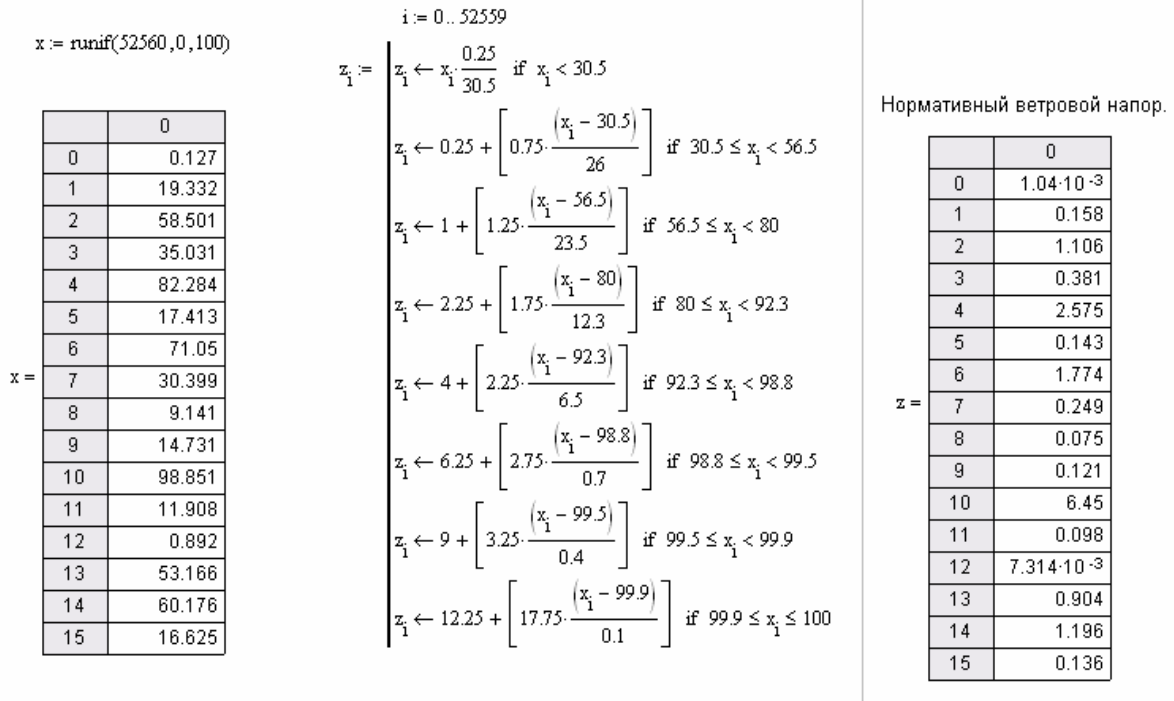


Рис. 7. Программа моделирования ветрового напора с интервалом 10 минут в течение года

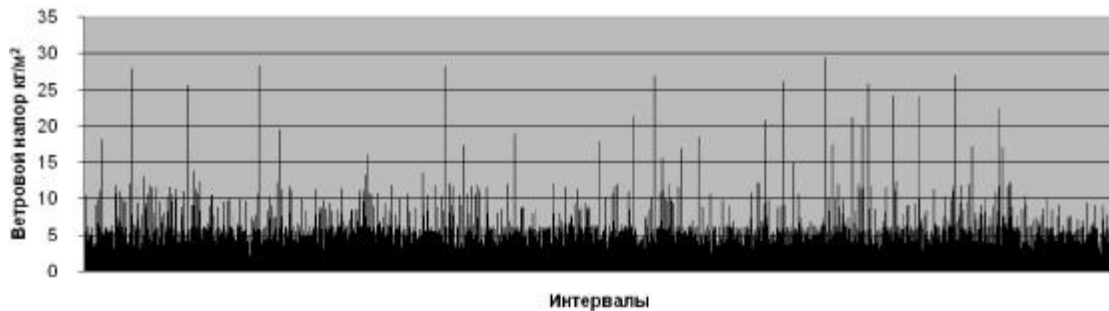


Рис. 8. Результаты моделирования ветрового напора с интервалом 10 минут в течение года

Полученные результаты моделирования ветрового напора с интервалом 10 минут показывают, что число дней со скоростью ветра более 14 м/с составляет 28 дней, в то время как статистические данные показывают, что в среднем таких дней в году 10.

Откорректируем продолжительность интервала моделирования, приняв его равным 30 минутам, что лучше соответствует среднему периоду изменчивости скорости ветра. Результаты моделирования ветрового напора с интервалом 30 минут в течение года приведены на рис. 9.

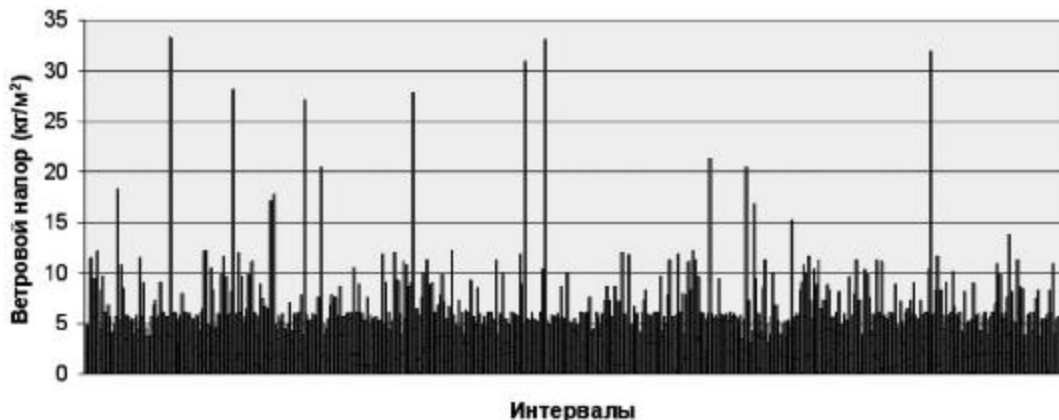


Рис. 9. Результаты моделирования ветрового напора с интервалом 30 минут в течение года

Результаты моделирования ветрового напора с интервалом 30 минут показывают, что число дней со скоростью ветра более 14 м/с составляет 13 дней, что в лучшей степени соответствует статистическим данным метеонаблюдений.

Выполним статистическое моделирование ветрового давления вторым методом, с использованием распределений Вейбулла [6].

$$F(V) = \exp\left[-\left(\frac{V}{h}\right)^a\right], \quad (3)$$

$$F(V) = \exp[-IV^b], \quad (4)$$

где a, b, h, I – коэффициенты, определенные в зависимости от ветрового района территории, приведены в работе [4].

Для генерации случайных чисел с использованием распределений Вейбулла необходимо предварительно получить их обратные функции: $V = h(-\log(r))^{1/a}$, $V = [1/I \ln(1/(1-r))]^{1/b}$,

где r есть случайное число, получаемое равномерным распределением на интервале (0,1).

Программа и результаты численного моделирования с использованием распределений Вейбулла представлены на рисунках 10-11.

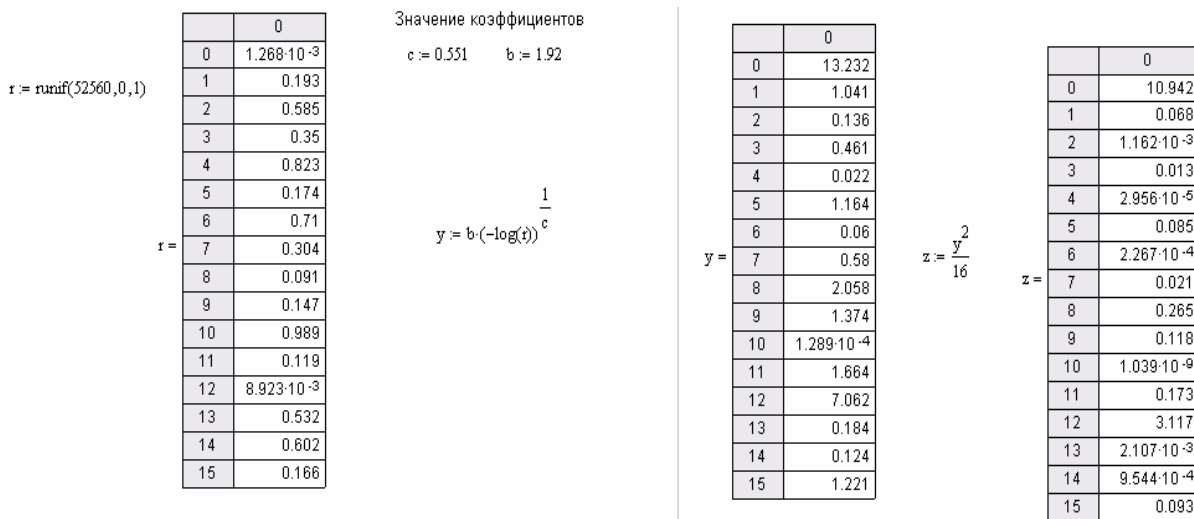


Рис. 10. Программа для моделирования ветрового напора законом распределения Вейбулла

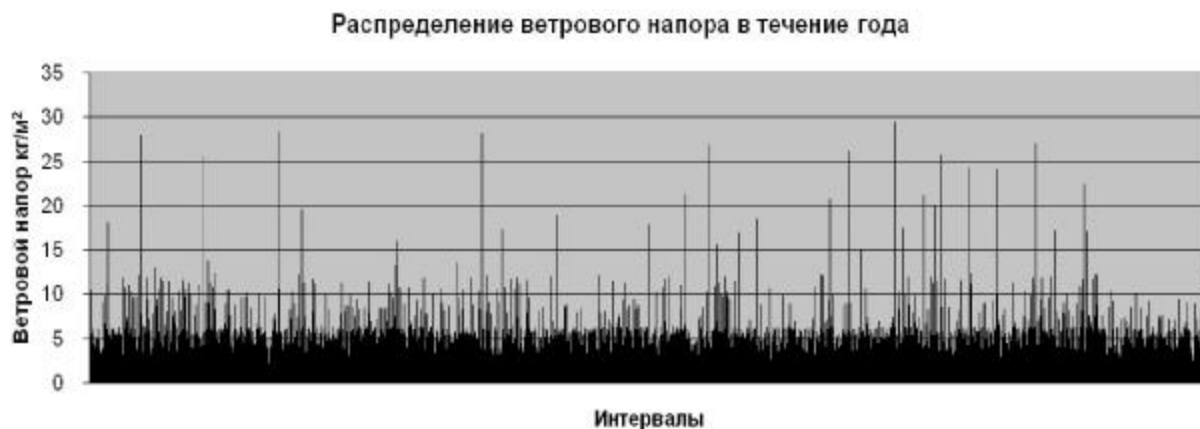


Рис. 11. Гистограмма результатов моделирования ветрового напора законом распределения Вейбулла

Сравнение реальных метеорологических наблюдений с полученными результатами моделирования ветровой нагрузки за 20 лет и за 100 лет приведены в таблице 6.

Таблица 6

Наименование параметра	Статистическое моделирование за 20 лет		Статистическое моделирование за 100 лет		Результаты наблюдений метеостанции г. Казань за 58 лет
	Нормальное распр.	Вейбулла распр.	Нормальное распр.	Вейбулла распр.	
Максимальная скорость ветра (м/с)	28.1	32.3	29.77	35.2	28-30
Максимальный ветровой напор (кг/м ²)	49.4	65.4	55.4	77.4	49-56
Количество случаев со скоростью более 27 м/с	5 случаев (50 мин.)	9 случаев (90 мин.)	16 случаев (160 мин.)	23 случая (230 мин.)	2 случая за 2007 и 2008 гг. (60 мин.)

Моделирование направления ветра осуществлено с использованием статистических данных по повторяемости направлений ветра (табл. 5, рис. 1). Суть моделирования состоит в том, чтобы все сгенерированные числа, в интервале от 0 до 100, равномерно разделить на процентные отрезки, согласно таблице 5, и каждому отрезку задать своё направление. Результаты моделирования направления ветра за год (всего 52560 случаев) с 10 минутным интервалом осреднения представлены в таблице 7.

Таблица 7

Направление ветра	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Количество случаев, согласно статическому моделированию	5189	3767	4246	6410	11094	6423	8912	6519
Количество случаев, согласно метеонаблюдениям	5256	3680	4204	6482	11038	6482	8936	6482

Выводы:

Разработаны алгоритмы метода Монте-Карло для статистического моделирования ветрового напора для территории г. Казани. По результатам тестовых решений выбраны параметры моделирования, отражающие в наиболее адекватном виде статистические данные 56-летних метеонаблюдений скорости ветров местной метеостанции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Windstorm Import Reduction Implementation Plan // A Report of National Science and Technology Council, April, 2006. – 30 pp.
2. Пособие к СНиП II-23-81* по проектированию стальных конструкций. – М.: Стройиздат, 1989. – С. 250.
3. Руководство по расчёту зданий и сооружений на воздействие ветра. – М.: Стройиздат, 1978. – С. 218.
4. СТО 36554501-015-2008. Нагрузки и воздействия. – М.: Стройиздат, 2008. – С. 49.
5. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействия ветра на здания и сооружения. Перевод с англ. Б.Е. Масловой, А.Е. Швецовою; Под ред. Б.Е. Маслова. – М.: Стройиздат, 1984. – С. 360.
6. СНиП 23-01-99. Строительная климатология / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 2003. – С. 56.
7. Метеорологический ежемесячник. Ч. II. – Л.: Гидрометеоздат, 1950, вып. 1-34.
8. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3, Части 1-12, вып. 12. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – С. 610.