

STATISTICAL MODEL OF AERODYNAMIC IMPACT ON THE LARGE-SPAN COVERAGE

*Vladimir I. Erofeev¹, Aleksandr V. Ilyakhinsky¹, Elena A. Nikitina¹,
Vladimir M. Rodyushkin¹, Pavel A. Khazov², Andrey A. Satanov¹*

¹ Mechanical Engineering Research Institute of the RAS – Branch of Federal Research Center «A.V. Gaponov – Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences», Nizhny Novgorod, RUSSIA

² Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, RUSSIA

Abstract: The aim of the study was to study the possibility of using the Dirichlet distribution as a statistical model of the process of dynamic interaction of large-span structures with aerodynamic load. As an object of research, a model of a hangar building was chosen for the maintenance of two AirbusA-380 aircraft at a scale of 1:500 blown in a wind tunnel at five directions of wind flow at angles of 0°, 30°, 45°, 60°, 90° to the front of the structure ... It is shown that the statistical model of the Dirichlet distribution has sufficient flexibility and realism and compares favorably with the models built on the basis of the normal distribution, beta distribution, gamma distribution and Poisson distribution when describing the processes of intense dynamic interaction of wind load with structural elements. The problem of finding an integral assessment of the state of the processes of interaction of the wind load with the hangar building for the maintenance of two aircraft was reduced to calculating the self-organization parameter of the distribution over the surface of the building model of the aerodynamic coefficients, which was taken as the ratio of the total weighted amount of the Dirichlet models detected in the analyzed numerical series of the registered signal i -th dimension with negative external entropy to the total weighted number of Dirichlet models with positive external entropy.

The study showed that the dimensionless informational and statistical indicator of self-organization makes it possible from a unified standpoint to assess the states that differ from each other in terms of external signs, the processes of interaction and their dynamics. The integral indicator can be used to rank the efficiency of operating systems and can be useful in assessing the state of the processes of dynamic interaction of the operating pressure and objects and structures of various shapes and purposes.

Keywords: wind load, statistical model, Dirichlet distribution, entropy, self-organization

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БОЛЬШЕПРОЛЕТНОЕ ПОКРЫТИЕ

*В.И. Ерофеев¹, А.В. Иляхинский¹, Е.А. Никитина¹, В.М. Родюшкин¹,
П.А. Хазов², А.А. Сатанов¹*

¹ Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук», г. Нижний Новгород, РОССИЯ

² Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, г. Нижний Новгород, РОССИЯ

Аннотация: Целью исследования являлось изучение возможности использования распределения Дирихле в качестве статистической модели процесса динамического взаимодействия большепролетных конструкций с ветровыми нагрузками. В качестве объекта исследования был выбран макет здания ангара для технического обслуживания двух самолетов AirbusA-380, разработанный в масштабе 1:500, который подвергалась аэродинамическим воздействиям в аэродинамической трубе по пяти различным направлениям ветрового потока под углами 0°, 30°, 45°, 60°, 90° к передней части конструкции. Показано, что статистическая модель распределения Дирихле обладает достаточной гибкостью, отражает реальную картину и выгодно отличается от моделей, построенных на основе нормального распределения, бета-распределения, гамма-распределения и распределения Пуассона при описании процессов интенсивного динамического воздействия ветра на элементы покрытия. Задача нахождения интегральной оценки состояния процессов взаимодействия ветровой нагрузки со зданием ангара для технического обслуживания

двух самолетов сводилась к вычислению параметра самоорганизации распределения по поверхности макета здания значений аэродинамических коэффициентов, в качестве которого была принята величина отношения суммарного взвешенного количества выявленных в анализируемом числовом ряде зарегистрированного сигнала моделей Дирихле i -ой размерности, имеющих отрицательное значение внешней энтропии, к суммарному взвешенному количеству моделей Дирихле, имеющих положительное значение внешней энтропии.

Проведенное исследование показало, что безразмерный информационно-статистический показатель самоорганизации позволяет с единых позиций оценить состояния, отличающихся между собой по внешним признакам процессы взаимодействия и их динамику. Интегральный показатель может быть использован для ранжирования эффективности действующих систем и может оказаться полезным при оценке состояния процессов динамического взаимодействия действующего давления и различных по форме и назначению объектов и конструкций.

Ключевые слова: ветровая нагрузка, статистическая модель, распределение Дирихле, энтропия, самоорганизация

1. INTRODUCTION

Structural aerodynamics have always been considered quite important and paramount in design. Many works of domestic and foreign authors are devoted to the study of the distribution of aerodynamic loads on various objects and structures using methods of numerical modeling and experiments in a wind tunnel [1-6]. However, there is no unified methodology for assessing the state of the processes of dynamic interaction of the operating pressure and objects and structures of various shapes and purposes. For large objects of complex shape, taking into account the wind profile, this problem is not fully solved even with modern computing means [7-12]. In particular, as shown by the results of experiments, the aerodynamic characteristics for large-span buildings, as a rule, differ for each object [13-18]. The main approach to solving the problem of the distribution of aerodynamic loads consists in setting a mathematical model of a building or structure and solving three-dimensional equations of fluid and gas motion with adequate turbulence models implemented in modern software and computational systems for fluid dynamics, as well as carrying out a physical test of the model in a wind tunnel. At the same time, the question of assessing the nature of the interaction of large-span structures with a complex geometric shape as a whole with the aerodynamic load remains, as a rule, open. Therefore, obtaining an assessment of the state

of the processes of interaction of wind load with complex large-span structures based on the use of new information technologies requires further development.

2. MATERIALS AND METHODS

Modern large-span structures are a complex system consisting of a complex of various subsystems, which, in the course of the action of the wind load, through the exchange of energy, are interconnected by processes of intense dynamic interaction. In this system, complex transient processes occur and critical chaotic regimes arise, as a result of which self-organization processes can occur, which means that the system's reactions are determined not only by external forces, but mainly by its structure and internal connections. A large number of interacting elements, the influence of many poorly controlled external factors lead to the fact that the processes that determine the state of such structures reveal a probabilistic nature and can be represented by a statistical model (image) in the form of a probability density function defined on a limited interval by the Dirichlet distribution. The model reflects the result of joint implementation of $n-1$ independent processes x_j , proceeding with speeds (intensities) v_j , and the opposite process in the sense of the process, proceeding with a speed v_n . In this sense, the distribution is informa-

tionally equivalent to an object of any nature and degree of complexity [19]. The probability density function of the Dirichlet distribution, defined on a k-dimensional simplex, is

$$D(x_1, \dots, x_k) = \frac{\Gamma(a_n)}{\prod_{i=1}^n \Gamma(v_i)} \prod_{i=1}^k x_i^{v_i-1} \times (1 - \sum_{i=1}^k x_i)^{v_n-1} \quad (1)$$

$$0 \leq \sum x_i \leq 1; v_i \geq 0, \dots, v_n \geq 0; \sum_{i=1}^n v_i = a_n; n = k+1$$

In (1) $\Gamma(x)$ is the gamma function. The entropy of the Dirichlet distribution according to the definition

$$H = - \int_x \varphi(x) \log_{\alpha} \varphi(x) dx \quad (2)$$

up to the base of the logarithm is

$$H(v_1, \dots, v_n) = \prod_{i=1}^n \Gamma(v_i) - \ln \Gamma(a_n) + (a_n - n) \psi(a_n) - \sum_{i=1}^n (v_i - 1) \psi(v_i) \quad (3)$$

Here in (4) and (5) $\psi(x) = \frac{d}{dx} \ln \Gamma(x)$ is the logarithmic derivative of the gamma function (Euler's psi-function). The entropy of the Dirichlet distribution can be represented as the sum

$$H(D) = H_i(v_1, \dots, v_n) + H_e(a_n) \quad (4)$$

in which the always positive term

$$H_i(v_1, \dots, v_n) = \ln \prod_{i=1}^n \Gamma(v_i) - \sum_{i=1}^n (v_i - 1) \psi(v_i) \quad (5)$$

represents the entropy production corresponding to the second law of thermodynamics, and the term

$$H_e(a_n) = -\ln \Gamma(a_n) + (a_n - n) \psi(a_n) \quad (6)$$

represents the entropy flow characterizing the processes of interaction with the external environment. At $n \geq 3$ the entropy flux (6) can take both positive and negative values.

With an unlimited increase in the number of processes proceeding at the same speeds

($v_1 = \dots = v_n = v_\gamma$) the Dirichlet distribution can be approximately replaced by a gamma distribution with density

$$\gamma(x) = \frac{x^{v_\gamma-1}}{\Gamma(v_\gamma)} \exp(-x), x \geq 0, v_\gamma \geq 0 \quad (7)$$

and the entropy

$$H_\gamma = v_\gamma + \ln \Gamma(v_\gamma) - (v_\gamma - 1)\psi(v_\gamma) \quad (8)$$

The expression for the entropy of the gamma distribution does not allow to select any part of it that characterizes the entropy flux. Therefore, the model represented by the gamma distribution corresponds to an isolated system. Consequently, the choice of this model when describing processes in problems of atmospheric sounding [20,21] or in problems of detection [22,23] is incorrect, since an isolated system does not take into account the interaction of an object with the external environment. As a statistical model, the gamma distribution is only to

the extent a satisfactory model for observing the state of an object, in which it is possible to implement an infinitely increasing number of processes proceeding at the same speeds.

At $v_\gamma = 1$ (7) it turns into an exponential distribution — a model of observation (but not a mechanism) of radioactive decay.

If the speeds of processes take on discrete values, and the number of processes is large, but of course, then the model will correspond to the Poisson distribution, which has the form:

$$f_p = \frac{v^x}{x!} \exp(-v); v > 0; x = 1, 2, \dots \quad (9)$$

Like the gamma distribution, the Poisson distribution is a fluctuation model, since the mathematical expectation (space-time characteristic) for (9) is by definition equal to the second cen-

tral moment (impulse-energy characteristic). It can be shown that the expression for the entropy of distribution (9)

$$H_p = v(1 - \ln v) + \ln \Gamma(1+v) + \frac{v}{2} \psi^1(1+v) \quad (10)$$

does not allow, as in the case of the gamma distribution, to single out the entropy flux. Consequently, model (11) corresponds to an isolated system with all the ensuing consequences. It should be noted that the normal distribution, defined on an unlimited interval, as a statistical model of the researched process, assumes that the investigated object has physical properties, the parameters of which tend to an infinitely large or small value. Obviously, there are no such properties.

Thus, of all the considered distributions, only the Dirichlet distribution has sufficient flexibility and realism, which favorably distinguishes it from the models built on the basis of the normal distribution, beta distribution, gamma distribution and Poisson distribution.

The object of the study is the projected hangar building for the maintenance of two AirbusA-380 aircraft in Moscow, covered by spatial arches with a span of 227.65 m (Fig. 1).

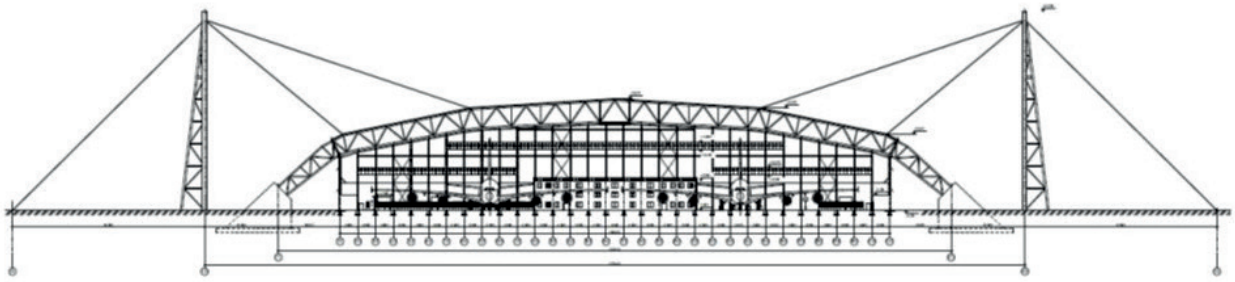


Figure 1. Main section of the hangar for maintenance

For testing in a wind tunnel, a model of the hangar building on a scale of 1: 500 was made on a 3D printer. The pressure measurement at characteristic points of the coating surface was carried out by means of a drainage system of 126 air outlet pipes connected to a micromanometer. The experiment was carried out for five directions of the wind flow, at angles of 0°, 30°, 45°, 60°, 90° with respect to the front of the structure. The tests were carried out in the laboratory of the Department of Heating and Ventilation of NNGASU.

The problem of finding an integral assessment of the state of the processes of interaction of the wind load with the hangar building for the maintenance of two aircraft was reduced to calculating the self-organization parameter of the distribution over the surface of the building model of the values of aerodynamic coefficients (tab. 1-5), which was taken as the value [23]

$$K_c = \frac{\sum iQ_{D-}^i}{\sum iQ_{D+}^i} \quad (11)$$

of the ratio of the total weighted $\sum iQ_{D-}^i$ number Q of Dirichlet models of i dimension, which have a negative value of the external (flow) entropy, revealed in the analyzed numerical series of the registered signal, to the total weighted $\sum iQ_{D+}^i$ number of Dirichlet models with a positive value of the external entropy.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The obtained values of the aerodynamic coefficients $C_w = P_{sur}/P_o$, where P_{sur} is the pressure measured at the studied point of the surface, and P_o is the dynamic pressure exerted by the wind flow on the vertical surface, are given in tables 1-5.

The values of the self-organization parameter of the distribution of aerodynamic coefficients for different directions of the wind load are shown in Fig. 2.

Table 1. The values of the aerodynamic coefficients C_w at a wind flow direction of 0°

-0,15	-0,15	-0,10	-0,12	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,12	-0,15
-0,17	-0,17	-0,15	-0,17	-0,17	-0,17	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,17	-0,17	-0,15	-0,17
-0,17	-0,20	-0,20	-0,24	-0,27	-0,27	-0,24	-0,24	-0,27	-0,27	-0,20	-0,20	-0,17	-0,17
-0,22	-0,24	-0,27	-0,32	-0,29	-0,34	-0,37	-0,34	-0,37	-0,34	-0,29	-0,27	-0,24	-0,20
-0,29	-0,34	-0,37	-0,44	-0,41	-0,44	-0,46	-0,44	-0,44	-0,44	-0,41	-0,32	-0,29	-0,27
-0,41	-0,51	-0,51	-0,54	-0,56	-0,56	-0,54	-0,56	-0,54	-0,54	-0,51	-0,46	-0,37	-0,37
-0,54	-0,61	-0,61	-0,61	-0,63	-0,61	-0,61	-0,63	-0,63	-0,63	-0,61	-0,59	-0,51	-0,49
-0,63	-0,68	-0,66	-0,66	-0,68	-0,66	-0,63	-0,66	-0,71	-0,68	-0,68	-0,68	-0,68	-0,59
-0,76	-0,80	-0,73	-0,71	-0,68	-0,68	-0,68	-0,66	-0,73	-0,71	-0,76	-0,76	-0,78	-0,78

Table 2. The values of the aerodynamic coefficients C_w at a wind flow direction of 30°

-0,32	-0,22	-0,22	-0,24	-0,19	-0,14	-0,16	-0,27	-0,16	-0,14	-0,14	-0,14	-0,11	-0,11
-0,38	-0,22	-0,22	-0,27	-0,19	-0,16	-0,22	-0,30	-0,16	-0,14	-0,16	-0,16	-0,11	-0,11
-0,41	-0,22	-0,19	-0,27	-0,16	-0,16	-0,24	-0,35	-0,19	-0,16	-0,19	-0,16	-0,11	-0,11
-0,41	-0,22	-0,22	-0,30	-0,19	-0,19	-0,24	-0,35	-0,19	-0,16	-0,22	-0,16	-0,11	-0,11
-0,41	-0,22	-0,22	-0,27	-0,19	-0,19	-0,24	-0,35	-0,22	-0,19	-0,22	-0,19	-0,11	-0,11
-0,41	-0,22	-0,19	-0,27	-0,19	-0,19	-0,24	-0,38	-0,22	-0,19	-0,22	-0,19	-0,11	-0,08
-0,38	-0,19	-0,19	-0,24	-0,19	-0,16	-0,22	-0,35	-0,19	-0,19	-0,22	-0,19	-0,14	-0,11
-0,32	-0,19	-0,16	-0,24	-0,16	-0,14	-0,22	-0,30	-0,19	-0,16	-0,22	-0,19	-0,14	-0,11
-0,30	-0,16	-0,19	-0,22	-0,14	-0,14	-0,19	-0,30	-0,16	-0,16	-0,19	-0,19	-0,16	-0,14

Table 3. The values of the aerodynamic coefficients C_w at a wind flow direction of 45°

-0,03	-0,13	-0,13	-0,17	-0,17	-0,13	-0,20	-0,17	-0,17	-0,20	-0,23	-0,27	-0,20	-0,27
-0,03	-0,10	-0,10	-0,13	-0,13	-0,10	-0,17	-0,13	-0,10	-0,13	-0,13	-0,17	-0,10	-0,20
-0,03	-0,10	-0,10	-0,13	-0,13	-0,10	-0,13	-0,13	-0,10	-0,10	-0,13	-0,13	-0,07	-0,17
-0,03	-0,10	-0,10	-0,13	-0,13	-0,10	-0,13	-0,13	-0,10	-0,10	-0,10	-0,10	-0,07	-0,13
-0,10	-0,13	-0,13	-0,20	-0,17	-0,13	-0,13	-0,17	-0,10	-0,10	-0,10	-0,07	-0,07	-0,13
-0,13	-0,13	-0,17	-0,23	-0,27	-0,20	-0,27	-0,27	-0,20	-0,17	-0,13	-0,07	-0,07	-0,10
-0,13	-0,17	-0,20	-0,27	-0,33	-0,30	-0,53	-0,53	-0,50	-0,37	-0,30	-0,20	-0,07	-0,10
-0,17	-0,20	-0,23	-0,37	-0,40	-0,43	-0,60	-0,60	-0,63	-0,70	-0,67	-0,63	-0,33	-0,13
-0,23	-0,23	-0,27	-0,40	-0,53	-0,57	-0,60	-0,63	-0,70	-0,87	-1,00	-1,07	-1,10	-0,60

Table 4. The values of the aerodynamic coefficients C_w at a wind flow direction of 60°

-0,04	-0,07	-0,11	-0,15	-0,19	-0,22	-0,26	-0,30	-0,11	-0,22	-0,26	-0,26	-0,15	-0,19
-0,04	-0,07	-0,11	-0,15	-0,15	-0,15	-0,19	-0,26	-0,11	-0,19	-0,19	-0,19	-0,15	-0,22
-0,04	-0,04	-0,07	-0,15	-0,15	-0,15	-0,19	-0,22	-0,07	-0,19	-0,19	-0,19	-0,15	-0,22
-0,04	-0,04	-0,07	-0,15	-0,15	-0,11	-0,19	-0,19	-0,07	-0,15	-0,19	-0,19	-0,15	-0,26
-0,04	-0,04	-0,07	-0,11	-0,15	-0,11	-0,19	-0,19	-0,07	-0,15	-0,19	-0,15	-0,15	-0,22
-0,04	-0,07	-0,07	-0,15	-0,11	-0,11	-0,19	-0,19	-0,07	-0,15	-0,15	-0,15	-0,11	-0,22
-0,04	-0,07	-0,11	-0,15	-0,11	-0,11	-0,22	-0,19	-0,07	-0,15	-0,15	-0,15	-0,11	-0,22
-0,07	-0,11	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,30	-0,19	-0,11	-0,11	-0,15	-0,15	-0,07	-0,19
-0,07	-0,15	-0,22	-0,33	-0,37	-0,33	-0,48	-0,33	-0,30	-0,30	-0,30	-0,30	-0,15	-0,07

Table 5. The values of the aerodynamic coefficients C_w at a wind flow direction of 90°

0,03	0,07	0,14	0,17	0,21	0,21	0,28	0,31	0,28	0,28	0,34	0,38	0,34	0,31
0,03	0,07	0,14	0,17	0,17	0,17	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,28
0,07	0,07	0,10	0,10	0,14	0,14	0,24	0,17	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,24
0,07	0,03	0,07	0,10	0,14	0,14	0,21	0,17	0,21	0,17	0,17	0,17	0,17	0,21
0,07	0,07	0,07	0,10	0,14	0,14	0,21	0,14	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,21
0,10	0,10	0,14	0,14	0,14	0,14	0,21	0,14	0,17	0,17	0,17	0,17	0,14	0,17
0,14	0,14	0,24	0,34	0,31	0,31	0,41	0,28	0,28	0,17	0,17	0,14	0,14	0,17
0,14	0,21	0,45	0,59	0,62	0,52	0,69	0,62	0,59	0,48	0,41	0,28	0,14	0,14
0,17	0,24	0,45	0,66	0,69	0,66	0,72	0,69	0,69	0,90	0,93	0,79	0,62	0,24

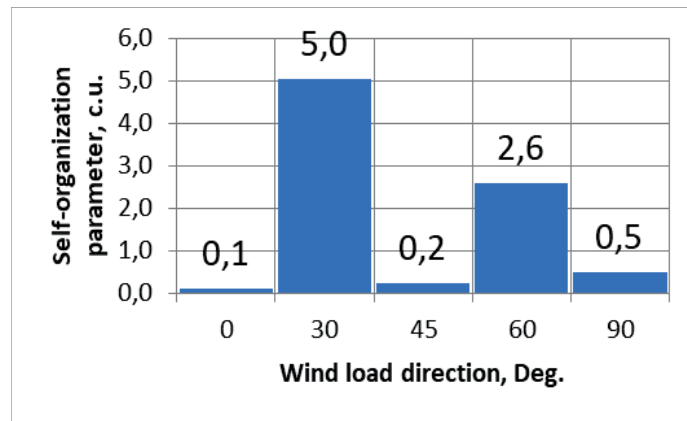


Figure 2. The values of the self-organization parameter of the distribution of aerodynamic coefficients for a hangar building for the maintenance of two aircraft at different directions of wind load

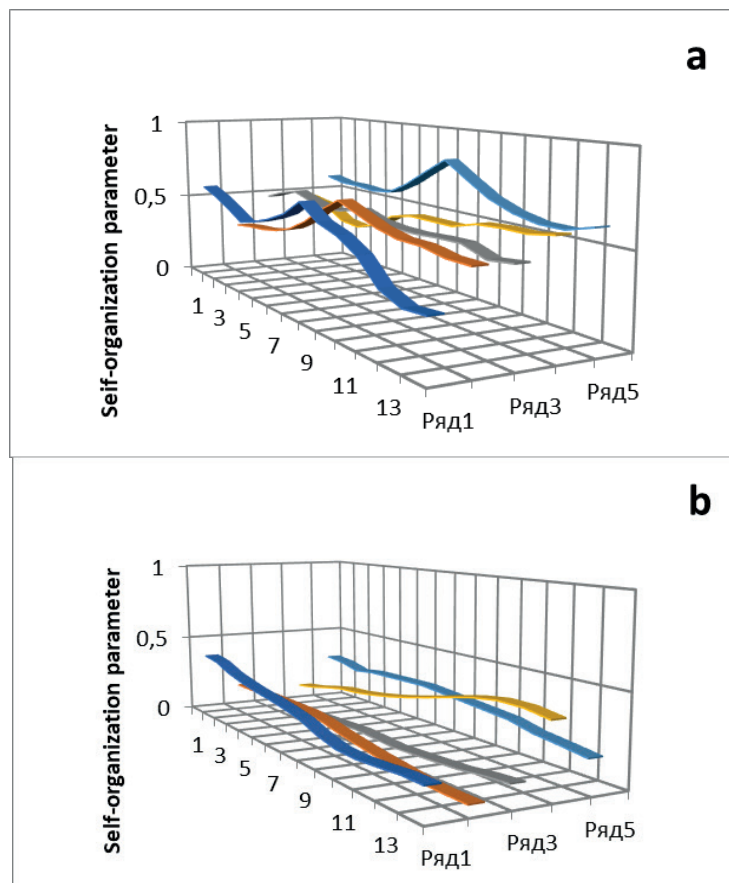


Figure 3. Distribution of the self-organization parameter over the hangar surface for two directions of the wind flow: a – 90 degrees (frontal direction); b – 0 degrees (longitudinal direction)

If we consider self-organization as a process, the essence of which is the formation of a set of actions leading to the creation of a stable system response, then, as follows from Figures 2, 3, the interaction of the wind flow with the object of study is complex. This interaction is greatest at

angles of 30 and 60 degrees, and the least at the longitudinal direction of the wind flow. With the frontal direction of the wind flow, the process of interaction between the wind flow and the structure is maximal along the ends of the central part (Fig. 3a).

4. CONCLUSIONS

Our research has shown that a dimensionless informational and statistical indicator makes it possible from a unified standpoint to assess the states that differ from each other in terms of external signs, processes and their dynamics. The integral indicator can be used to rank the efficiency of operating systems and can be useful in assessing the state of the processes of dynamic interaction of the operating pressure and objects and structures of various shapes and purposes.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the state assignment of the IAP RAS for fundamental scientific research for 2021-2023 on topic No. 0030-2021-0025.

REFERENCES

1. **Eremeev P.G.** Sovremennije stal'nie konstruksii bol'sheproletnikh pokritij unikal'nikh zdaniy i sooruzhenij [Modern steel structures of large-span roofs of unique buildings and structures]. Moscow, ASV, 2009. 336 p.
2. **Simiu E., Scanlan R.** Wind effects on structures. New York, Wiley, 1978. 488 p.
3. **Retter E.I.** Arkhitekturno-stroitel'naya aerodinamika [Architectural and constructional aerodynamics]. Moscow, Stroyizdat, 1984. 294 p.
4. **Savitsky G.A.** Vetrovaya nagruzka na sooruzheniya [Wind load on structures]. Moscow, Izd-vo lit po str-vu, 1972. 111 p.
5. **Hoerner S.F.**, Fluid-dynamic drag: theoretical, experimental and statistical information. - Wachington, 1965. - 455p.
6. **Stankovic, S., Campbell N., Harries A.** Urban Wind Energy - London Taylor & Francis, 2009. - 200p.
7. **Mohamed A.** Comparison of the numerical study of the effect of building protrusion aerodynamics with the results of aerodynamic tests // 15th Australian wind energy society workshop. - Sydney. - 2012.- 4 p.
8. **Mou, B., He, B.-J., Zhao, D.-X., & Chau, K.-W.** (2017). Numerical simulation of the effects of building dimensional variation on wind pressure distribution. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 11(1), pp 293–309.
9. **Fevralskikh A.V.** Chislennoe issledovanie aerodinamicheskoy interferentsii startovoy sistemy podduva i kryla ekranoplana [Numerical study of aerodynamic interference of the launch air-inflation system and the wing of a wing-in-groundcraft]. Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra – Transactions of the Krylov State Scientific Center, 2019, Vol. 4(390), Pp. 117-124.
10. **Gnyrya A.I., Korobkov S.V., Koshin A.A., Terekhov V.I.** Modelirovanie vetrovykh nagruzok pri obtekanii vozdushnym potokom sistemy modeley zdaniy pri variatsii ikh raspolozheniya [Simulation of wind loads with air flow around a system of building models with a variation in their location]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2018, No 4, Pp.65-73.
11. **Muschanov V.F., Zubenko A.V., Drozdov A.A.** Issledovanie aerodinamicheskikh koeffitsientov provisayushchikh membrannykh pokrytiy inzhenernykh sooruzheniy [Study of the aerodynamic coefficients of sagging membrane coatings of engineering structures]. Metallicheskie konstruksii – Steel Constructions, 2017, vol. 23, No 2, Pp. 81-96.
12. **Lampsi B.B., Shilov S.S., Khazov P.A.** Chislennoe i fizicheskoe modelirovanie vetrovykh potokov na bol'sheproletnoe pokrytie [Numerical and physical modeling of wind loads on long-span shell structures]. Vestnik MGSU – (Monthly Journal

- on Construction and Architecture, 2022. Vol. 1, Pp. 21-31.
13. **Satanov, A.A., Simonov A.V., Khazov P. A.** Opredelenie aerodinamicheskikh harakteristik bol'sheproletnogo zdaniya eksperimental'nymi metodami [Experimental study of the aerodynamic characteristics of the large-span building] // Structural mechanics and structures, 2023. Vol. 1 (36). Pp. 63-74.
 14. **Anushchenko A.M., Erofeev V.I., Khazov P.A., Satanov A.A., Fevral'skikh A.V.** Issledovanie obtekaniya vozdushnymi potokami bol'sheproletnoj poverhnosti chislennym i eksperimental'nym metodami [Investigation of the air flow around a large-span surface by numerical and experimental methods] // Privolzhsky Scientific Journal, 2021. Vol. 1. Pp. 9-18.
 15. **Tryanina N.Yu., Obletov E.N., Samokhvalov I.A.** Aerodinamicheskoe vozdejstvie na panel'nye anteny bazovykh stancij [Aerodynamic impact on base station panel antennas]. Privolzhsky Scientific Journal, 2022. Vol. 1. Pp. 23-30.
 16. **Rajasekarababu K.B., Vinayagamurthy G., and Rajan S.S.** Experimental and computational investigation of outdoor wind flow around a setback building, Build. Simul., 2019, Vol. 12, Pp. 891–904.
 17. **Valger, S.A.** On numerical modeling of aerodynamics of urban developments on unstructured computational grids. Thermophys. Aeromech. 28, Pp. 507–522 (2021).
 18. **Khazov P.A., Anushchenko A.M., Onischuk E.A., Scholokova Yu.D.** Chislennoe i eksperimentalnoe issledovanie raspredeleniya vetrovoy nagruzki na krivolinye bol'sheprolyotnoe pokrytie [Numerical and experimental study of the distribution of the wind load on the curvilinear large-span covering]. Privolzhskiy nauchny zhurnal – Privolzhsky Scientific Journal, 2020. No 1, pp.16-21.
 19. **Sereda Yu.S.** Osnovi diagnostiki i prognozirovaniya [Fundamentals of Diagnostics and Forecasting]. Nizhny Novgorod, Tipografiya «Povolzhie», 2005. 188 p.
 20. **Ilyakhinsky A.V., Sereda Yu.S.** Statisticheskie modeli v zadachakh zondirovaniya [Statistical models in probing problems]. Izvestiya VUZov, Radiofizika – Radiophysics and Quantum Electronics, 1989, vol.32, No 12, pp. 1502-1505.
 21. **Egan J.P.** Signal Detection Theory and ROC Analysis, New York, 1975. 277 p.
 22. **Vatutin V.A., Televina T.M., Chistiakov V.P.** Veroyatnostniye metody v fizicheskikh issledovaniyakh [Probabilistic Methods in Physics Research]. Moscow, Nauka, 1985. 208 p.
 23. **Erofeev V.I., Ilyakhinsky A.V., Nikitina E.A., Pakhomov P.A., Rodyushkin V.M.** Ultrasonic sensing Method for evaluating the limit state of metal structures associated with the onset of plastic deformation. Physical Mesomechanics, 2020, vol. 23, No 3, pp. 241-245.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Еремеев, П.Г.** Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений: монография. - М.: ACB, 2009. - 336 с.
2. **Simiu E., Scanlan R.** Wind effects on structures. New York, Wiley, 1978. 488 p. ISBN: 978-0471021759
3. **Реттер, Э.И.** Архитектурно-строительная аэродинамика: монография. - М.: Стройиздат, 1984. - 294 с.
4. **Савицкий Г.А.** Ветровая нагрузка на сооружения. - М.: Изд-во лит. по стр-ву, 1972.- 111 с.
5. **Hoerner S.F.,** Fluid-dynamic drag: theoretical, experimental and statistical information. - Washington, 1965. - 455p.
6. **Stankovic, S., Campbell N., Harries A.** Urban Wind Energy - London Taylor & Francis, 2009. - 200p.
7. **Mohamed A.** Comparision of the numerical study of the effect of building protrusion aerodynamics with the results of aerodynamic tests // 15th Australian wind energy society workshop. - Sydney. - 2012.- 4 p.

8. **Mou, B., He, B.-J., Zhao, D.-X., & Chau, K.-W.** (2017). Numerical simulation of the effects of building dimensional variation on wind pressure distribution. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 11(1), Pp. 293–309.
9. **Февральских А.В.** Численное исследование аэродинамической интерференции стартовой системы поддува и крыла экраноплана / Февральских А.В. // Труды Крыловского государственного научного центра, 2019. – № 3(390). – С. 117-124.
10. **Гныря А.И., Коробков С.В., Кошин А.А., Терехов В.И.** Моделирование ветровых нагрузок при обтекании воздушным потоком системы моделей зданий при вариации их расположения // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета / Томский гос. архитектур.-строит. ун-т. – Томск, 2018. – № 4. – С. 65-73.
11. **Мушанов В.Ф., Зубенко А.В., Дроздов А.А.** Исследование аэродинамических коэффициентов провисающих мембранных покрытий инженерных сооружений // Металлические конструкции. – Макеевка. - 2017. - №2. - Том 23. - С. 81-96.
12. **Лампси, Б.Б., Шилов С.С., Хазов П.А.** Численное и физическое моделирование ветровых потоков на большепролетное покрытие // Вестник МГСУ. -2022. -Т. 17, № 1. - С. 21-31.
13. **Сатанов А.А., Симонов А.В., Хазов П.А.** Определение аэродинамических характеристик большепролетного здания экспериментальными методами // Строительная механика и конструкции. -2023. - № 1(36). - С. 63-74.
14. **Анущенко А.М., Ерофеев В.И., Хазов П.А., Сатанов А.А., Февральских А.В.** Исследование обтекания воздушными потоками большепролетной поверхности численным и экспериментальным методами // Приволжский научный журнал. - 2021. - № 1. - С. 9-18.
15. **Трянина, Н.Ю. Облетов Е. Н., Самохвалов И. А.** Аэродинамическое воздействие на панельные антенны базовых станций // Приволжский научный журнал. – 2022. – № 1(61). – С. 23-30.
16. **Rajasekarababu K.B., Vinayagamurthy G., and Rajan S.S.** Experimental and computational investigation of outdoor wind flow around a setback building, *Build. Simul.*, 2019, Vol. 12, P. 891–904.
17. **Valger, S.A.** On numerical modeling of aerodynamics of urban developments on unstructured computational grids. *Thermophys. Aeromech.* 28, 507–522 (2021).
18. **Хазов, П.А., Анущенко А.М., Онищук Е.А., Щелокова Ю.Д.** Численное и экспериментальное исследование распределения ветровой нагрузки на криволинейное большепролетное покрытие // Приволжский научный журнал /Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Нижний Новгород, 2020. – № 1. – С. 16-21.
19. **Середа Ю.С.** Основы диагностики и прогнозирования // Нижний Новгород Изд. «Типография «Поволжье», 2005. 188 с.
20. **Ильяхинский А.В., Середа Ю.С.** Статистические модели в задачах зондирования// Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 1989. Т. 32. № 12. С. 1502-1505.
21. **Egan J.P.** Signal Detection Theory and ROC Analysis, New York, 1975. 277 p.
22. **Ватутин В.Л., Телевинова Т.М., Чистяков В.П.** Вероятностные методы в физических исследованиях. - М.: Наука, 1985.- 208 с.
23. **Erofeev V.I., Ilyakhinsky A.V., Nikitina E.A., Pakhomov P.A., Rodyushkin V.M.** Ultrasonic sensing Method for evaluating the limit state of metal structures associated with the onset of plastic deformation. *Physical Mesomechanics*, 2020, vol. 23, No 3, pp. 241-245.

Vladimir Ivanovich Erofeev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director, Mechanical Engineering Research Institute of the RAS – Branch of Federal Research Center «A.V. Gaponov – Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences», 85, Belinskogo str., Nizhny Novgorod, 603024, Russia, e-mail: erof.vi@yandex.ru, tel: +7(831) 432-05-76.

Ilyakhinsky Aleksandr Vladimirovich, Senior Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the RAS – Branch of Federal Research Center «A.V. Gaponov – Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences», 85, Belinskogo str., Nizhny Novgorod, 603024, Russia, tel: +7(831) 432-23-87.

Elena Aleksandrovna Nikitina, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the RAS – Branch of Federal Research Center «A.V. Gaponov – Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences», 85, Belinskogo str., Nizhny Novgorod, 603024, Russia, tel: +7(831) 432-23-87.

Vladimir Mitrofanovich Rodyushkin, Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory, Mechanical Engineering Research Institute of the RAS – Branch of Federal Research Center «A.V. Gaponov – Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences», 85, Belinskogo str., Nizhny Novgorod, 603024, Russia, e-mail: vlkn2005@yandex.ru, tel: +7(831) 432-23-87.

Khazov Pavel Alekseevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theory of Structures and Technical Mechanics, Head of the Laboratory for Continuous Monitoring of the Technical Condition of Buildings and Structures, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 65, Ilyinskaya str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia, e-mail: khazov.nngasu@mail.ru, tel: +7 (951) 919-0-919.

Andrey Andreevich Satanov, post-graduate student, Mechanical Engineering Research Institute of the RAS – Branch of Federal Research Center «A.V. Gaponov – Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences», 85, Belinskogo str., Nizhny Novgorod, 603024, Russia, e-mail: andrewsatanov@gmail.com, tel: +79101333866.

Владимир Иванович Ерофеев, доктор физико-математических наук, профессор, директор, Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук» (ИПМ РАН), Адрес: д. 85, ул. Белинского, г. Нижний Новгород, 603024, Россия, e-mail: erof.vi@yandex.ru, тел. +7(831) 432-05-76.

Александр Владимирович Иляхинский, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук» (ИПМ РАН), Адрес: д. 85, ул. Белинского, г. Нижний Новгород, 603024, Россия, тел. +7(831) 432-23-87.

Елена Александровна Никитина, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук» (ИПМ РАН), Адрес: д. 85, ул. Белинского, г. Нижний Новгород, 603024, Россия, тел. +7(831) 432-23-87.

Владимир Митрофанович Родюшкин, доктор технических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук» (ИПМ РАН), Адрес: д. 85, ул. Белинского, г. Нижний Новгород, 603024, Россия, e-mail: vlkn2005@yandex.ru, тел. +7(831) 432-23-87.

Павел Алексеевич Хазов, кандидат технических наук, доцент кафедры теории сооружений и технической механики, заведующий лабораторией непрерывного контроля технического состояния зданий и сооружений, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет (ННГАСУ), Адрес: д. 65, ул. Ильинская, г. Нижний Новгород, 603950, Россия, e-mail: khazov.nngasu@mail.ru, тел. +7 (951) 919-0-919.

Андрей Андреевич Сатанов, аспирант, Институт проблем машиностроения РАН – филиал ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова – Грехова Российской академии наук» (ИПМ РАН), Адрес: д. 85, ул. Белинского, г. Нижний Новгород, 603024, Россия, e-mail: andrewsatanov@gmail.com, тел. +79101333866.