



УДК 004.896

П. А. ХАЗОВ¹, д-р техн. наук, доц. кафедры теории сооружений и технической механики; С. С. ШИЛОВ, аспирант кафедры теории сооружений и технической механики¹, инженер-конструктор²; Н. Д. МОЛОСНОВА¹, студент

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЛОБОИДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (996) 563-68-33; эл. почта: n.m.02@yandex.ru

Тел.: (951) 919-09-19; эл. почта: khazov.nngasu@mail.ru

²ООО «Строй-снаб».

Россия, 603000, г. Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 33, офис 13.

Тел.: (961) 631-06-81; эл. почта: sergey.shilov.1997@mail.ru

Ключевые слова: глобоид, компьютерное моделирование, цифровая модель, коэффициент формы, аэродинамические коэффициенты, алгоритмы автоматизации.

В статье представлены результаты разработки специализированной системы автоматизированного проектирования (САПР), предназначенной для определения значений и картины распределения аэродинамических параметров глобоидных поверхностей. В ходе работы выполнено компьютерное моделирование аэродинамического обтекания заданной геометрии в программном комплексе Ansys CFX. На основе полученных данных разработана алгоритмическая структура основной программы и подпрограмм, представленных в виде детализированных блок-схем.

Введение

Ветровое воздействие оказывает значительное влияние на проектирование и эксплуатацию различных объектов инфраструктуры и техники [1–3]. Оно способствует возникновению положительных и отрицательных давлений на поверхности тел, появлению турбулентности, приводящей к изменению плотности и скорости воздушных масс.

В настоящее время компьютеризация и цифровизация численного решения аэродинамических задач основываются на решении уравнений Навье–Стокса [4]. Аналитическое решение этих уравнений в общем случае невозможно из-за нелинейности их членов, в связи с чем для практического применения используются численные методы, позволяющие аппроксимировать решение путем дискретизации расчетной области на конечные элементы или контрольные объемы с последующим численным интегрированием исходных уравнений [5].

Глобоидные поверхности представляют собой особую категорию геометрических форм, полученных путем вращения эллиптического сечения или дуги окружности вокруг одной из осей [6]. Такая форма имеет переменную отрицательную гауссовую кривизну вдоль поверхности, что делает ее удобной для определенных видов нагрузок и условий эксплуатации. Такие поверхности

или поверхности, близкие к глобоидным, широко применяются в технических системах и механизмах, а также в строительстве [7–9].

Следует отметить, что формообразование и параметрическое моделирование глобоидных поверхностей является более простой задачей, по сравнению с гиперболоидными, а разработанные для глобоидов алгоритмы и методы аэродинамического анализа применимы в том числе и для гиперболоидных поверхностей с малой кривизной (рис. 1).

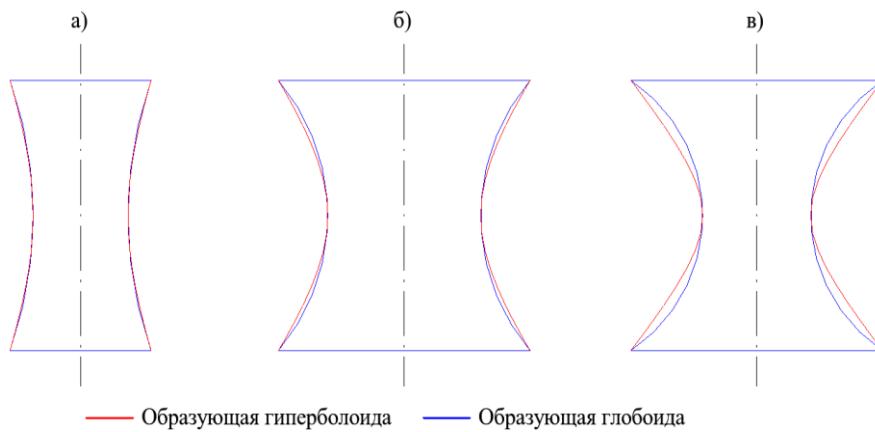


Рис. 1. Наложение форм гиперболоида и глобоида при относительной кривизне:
а – малой; б – средней; в – большой

Математическое описание глобоидных поверхностей

Поверхность глобоида можно выразить в виде параметрической зависимости, записанной как для внутренней части тороидной поверхности с определенными ограничениями. При проведении исследования было рассмотрено два случая глобоидной поверхности:

1) $R_1 = R_2 = R$ (рис. 2а).

Угол α может быть определен как:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{z}{R_o}\right) \quad (1)$$

Координаты точек поверхности, заданной параметрически, записываются:

$$\begin{cases} x(z) = \left((R_o + r) - R_o \cos\left(\arcsin\left(\frac{z}{R_o}\right)\right) \right) \cdot \cos \beta, \\ y(z) = \left((R_o + r) - R_o \cos\left(\arcsin\left(\frac{z}{R_o}\right)\right) \right) \cdot \sin \beta \end{cases} \quad (2)$$

где R_o – радиус образующей дуги окружности, r – радиус горловины поверхности.

Вводятся дополнительные ограничения для образования замкнутой поверхности:

$$\begin{cases} z \in \left[-\frac{H}{2}; \frac{H}{2} \right] \\ \beta \in [0; 2\pi) \end{cases} \quad (3)$$

2) $R_1 \neq R_2$ (рис. 2б).



Параметрическая запись координат поверхности в этом случае записывается так же, как в формуле (2), однако с измененными ограничениями:

$$\begin{cases} z \in [-H_m; (H - H_m)] \\ \beta \in [0; 2\pi] \end{cases} \quad (4)$$

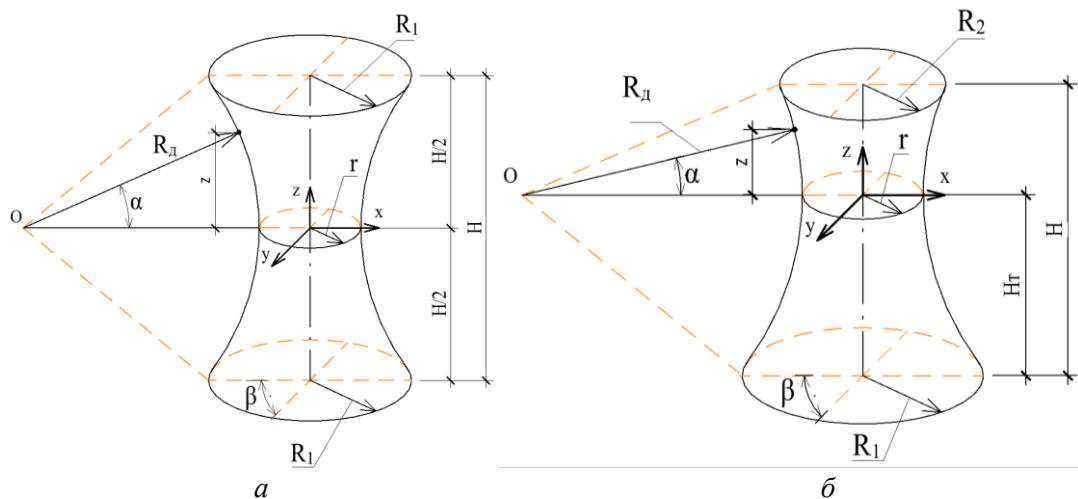


Рис. 2. Геометрическая интерпретация поверхности глоноида при: *а* – равных размерах оснований; *б* – различных размерах оснований

Компьютерное моделирование аэродинамических процессов

Компьютерное моделирование является одним из ключевых этапов разработки САПР, позволяющим заранее спрогнозировать поведение системы [10–12]. Для оценки влияния аэродинамических воздействий на исследуемые глоноидные поверхности применялись компьютерные программы, в которых реализованы модели потоков газов и жидкостей, в частности был использован *Ansys CFX* [13].

Объект исследования в плоскости распространения потока имеет форму круга, следовательно, для эксперимента необходимо только одно направление ветровых потоков. Рабочая область задана в виде параллелепипеда, так как при такой форме дискретизация сетки производится в более короткое время по сравнению с радиальными формами (рис. 3).

В качестве начальных условий задается профиль скорости ветра, постоянный по высоте. Значение скорости определяется из формулы 11.3 [14]:

$$v = \left(\frac{w_0}{0,43} \right)^{0.5} = \left(\frac{230,0}{0,43} \right)^{0.5} = 23,1 \frac{m}{s} \quad (5)$$

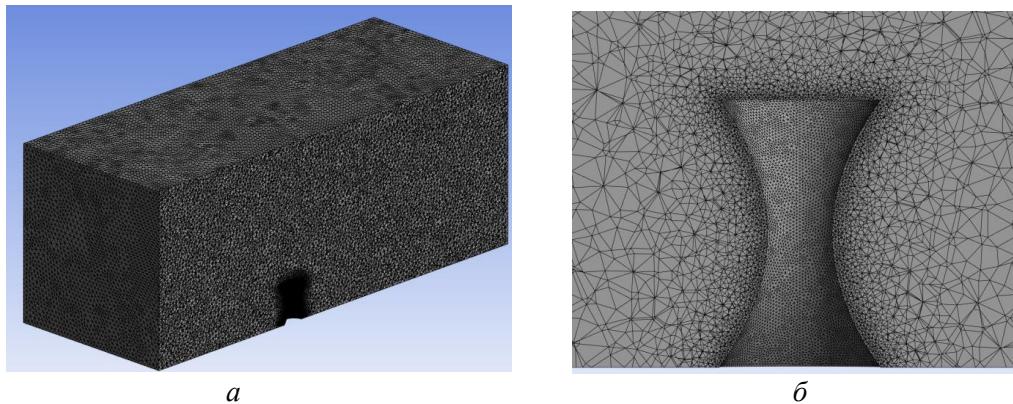


Рис. 3. Дискретизация рабочей области: *а* – общий вид; *б* – сгущение сетки вблизи объекта исследования

На границах расчетной области задаются необходимые условия:

- на передней грани (*Inlet*) задается профиль скорости ветра;
- на задней, верхней и боковых гранях (*Outlet*) задаются аналогичные параметры турбулентности, как и на входной границе, а также нулевое избыточное давление;
- на нижней границе и на поверхности объекта – условие непроницаемой стенки.

Результаты компьютерного моделирования аэродинамического обтекания глобоидных поверхностей представлены на рис. 4.

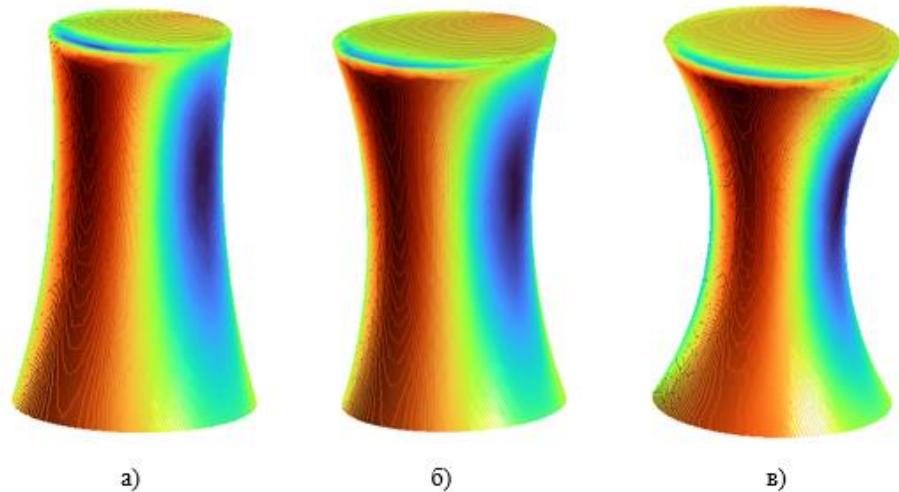


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования при параметрах формы:
а) $R_1 = 8,0, R_2 = 6,0, d = 5,5$; б) $R_1 = R_2 = 7,5, d = 5,5$; в) $R_1 = R_2 = 8,0, d = 4,5$

В общем случае было исследовано 28,0 цифровых моделей с различными параметрами:

- 1) $R = \text{const}, H = \text{const}, r \neq \text{const}$ (7,0 цифровых моделей);
- 2) $R \neq \text{const}, H = \text{const}, r = \text{const}$ (8,0 цифровых моделей);
- 3) $R = \text{const}, H \neq \text{const}, r = \text{const}$ (6,0 цифровых моделей);
- 4) $R_1 \neq R_2$ (7,0 цифровых моделей).



Алгоритм автоматизированного расчета аэродинамических параметров

При анализе результатов компьютерного моделирования аэродинамических особенностей поверхности глобоида было установлено, что имеются 3 характерные картины распределения искомых параметров (рис. 5–7). Каждая картина была разделена на области (*A*, *B* и *C*), для которых были получены осредненные значения аэродинамических коэффициентов.

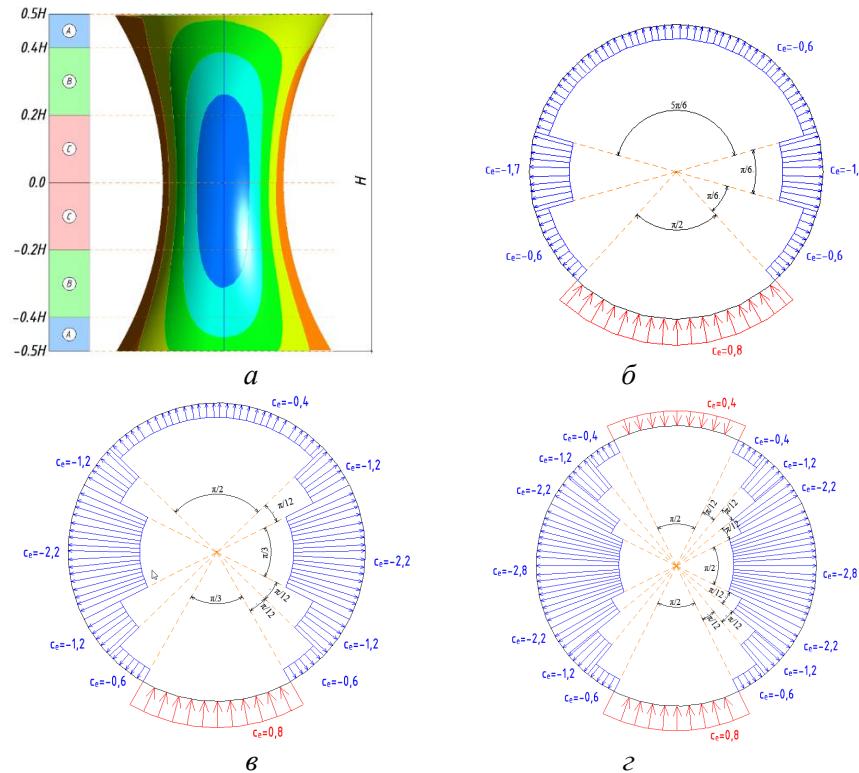


Рис. 5. Картинки распределения аэродинамических коэффициентов: *a* – общий вид первой картины при $R_1 = R_2$ ($k < 0,15$); *б* – для зоны "A"; *в* – для зоны "B"; *г* – для зоны "C"

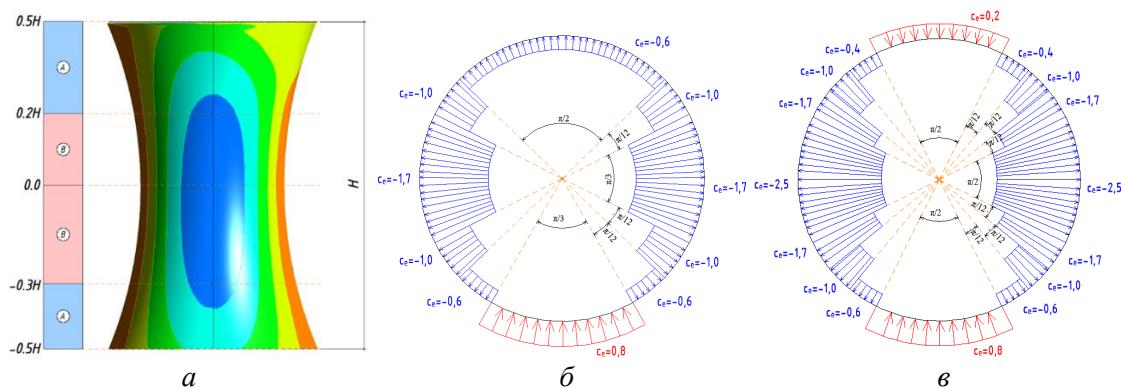


Рис. 6. Картинки распределения аэродинамических коэффициентов: *a* – общий вид второй картины при $R_1 = R_2$ ($k \geq 0,15$); *б* – для зоны "A"; *в* – для зоны "B"

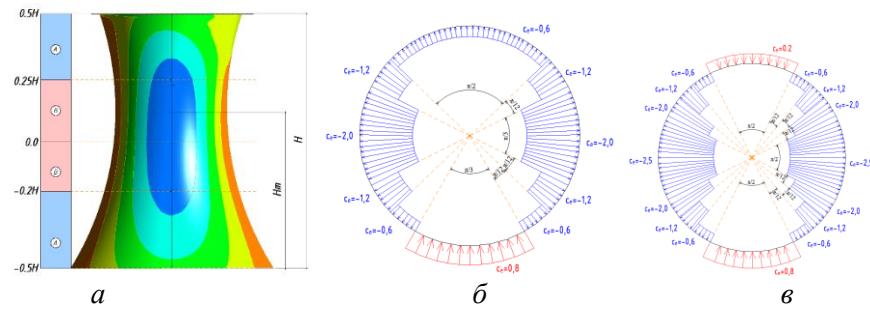


Рис. 7. Картинки распределения аэродинамических коэффициентов: *а* – общий вид картины при $R_1 \neq R_2$; *б* – для зоны "A"; *в* – для зоны "B"

Для возможности выделения момента, когда меняется характерная картина, вводится коэффициент формы, который в общем случае определяется по формуле:

$$k = \frac{R_1 + R_2 - 2r}{2H} \quad (6)$$

где: R_1 , R_2 – радиусы нижнего и верхнего оснований глобоидной формы; r – радиус горловины глобоидной формы; H – высота формы.

В процессе определения аэродинамических коэффициентов на глобоидной поверхности в первую очередь осуществляется ввод параметров R_1 , R_2 и r . Выбор картины распределения аэродинамических характеристик зависит от введенных исходных данных:

- при $R_1 = R_2$ и $k < 0,15$ – картина 1;
- при $R_1 = R_2$ и $k \geq 0,15$ – картина 2;
- при $R_1 \neq R_2$

Значение искомого параметра зависит от высоты, на которой располагается интересующая точка или сечение. Алгоритмизация принадлежности аэродинамических картин к рассматриваемой высоте продемонстрирована в виде блок-схем (рис. 8–10).

На основании полученных в результате проведенного исследования алгоритмов была разработана САПР, предназначенная для определения картины распределения аэродинамических показателей. На стартовом окне пользователь вводит высоту исследуемой формы и 3 радиуса: верхнего и нижнего оснований, а также горловины (рис. 11*а*). На основании этих входных данных происходит расчет миделева сечения с выводом полученного значения на главном экране. После подтверждения введенных результатов открывается второе окно, где представлена матрица распределения коэффициентов, отражающая аэродинамические характеристики по дискретной сетке (рис. 11*б*). Разработанная САПР состоит из подпрограммы, определяющей выбор сечения на рассматриваемой высоте (рис. 12), и основной программы, описывающей всю логику программного кода (рис. 13).

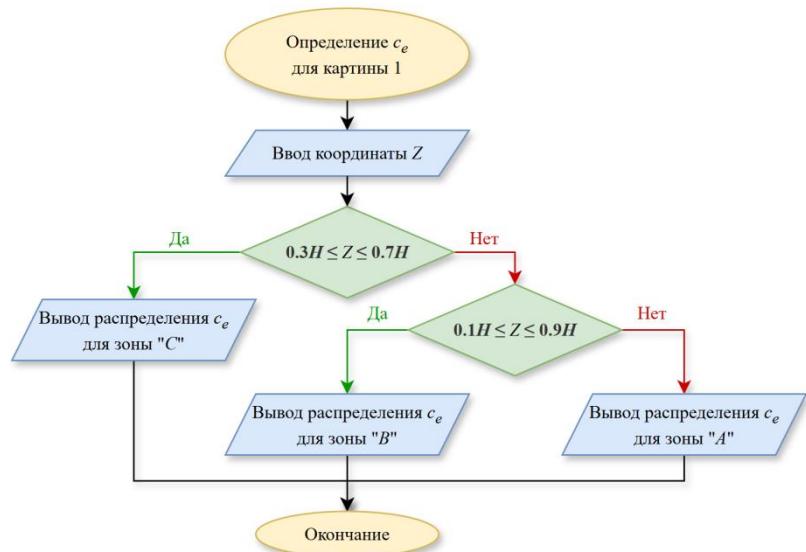


Рис. 8. Алгоритм определения аэродинамических параметров для картины 1

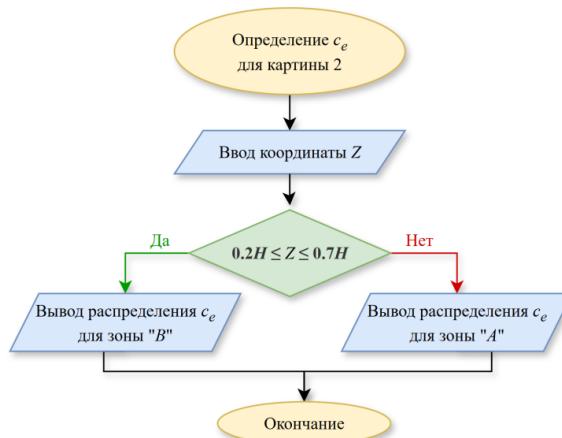


Рис. 9. Алгоритм определения аэродинамических параметров для картины 2

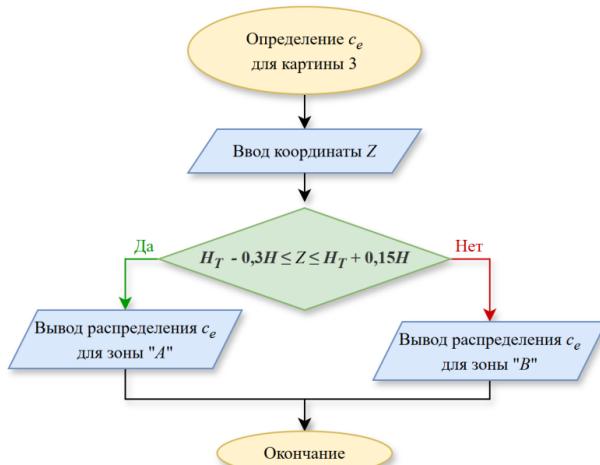


Рис. 10. Алгоритм определения аэродинамических параметров для картины 3

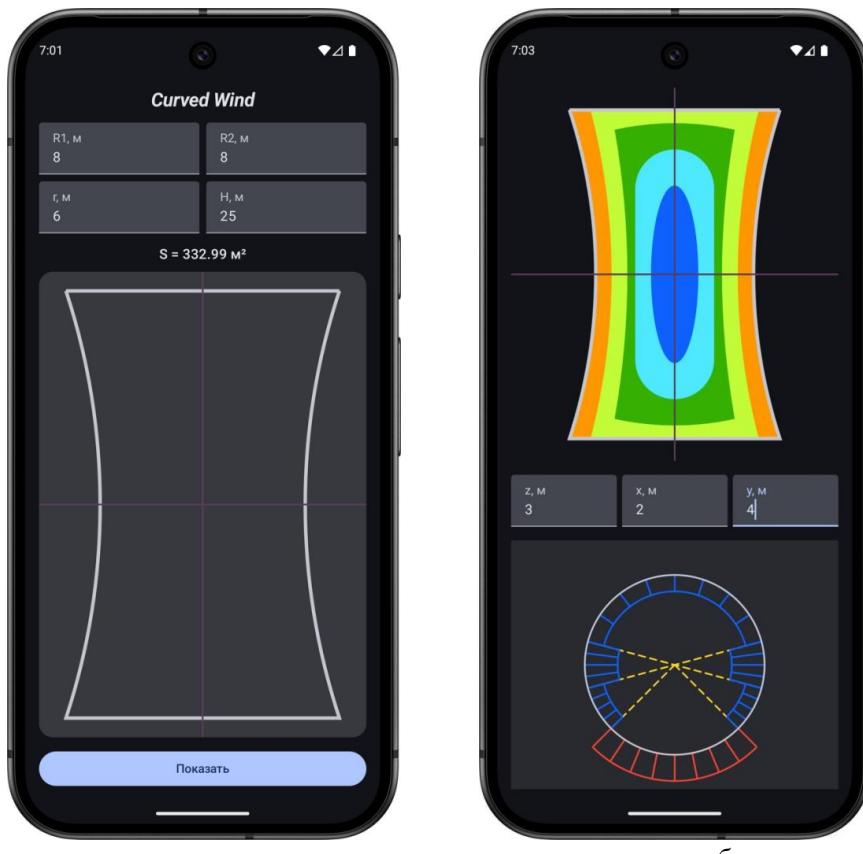


Рис. 11. Интерфейс системы автоматизированного расчета: *а* – начальный экран; *б* – экран результатов

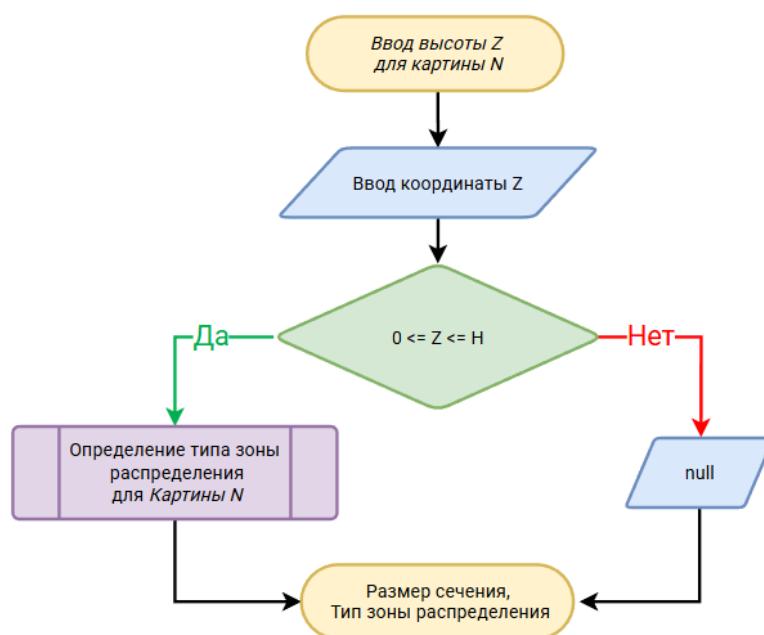


Рис. 12. Блок-схема подпрограммы

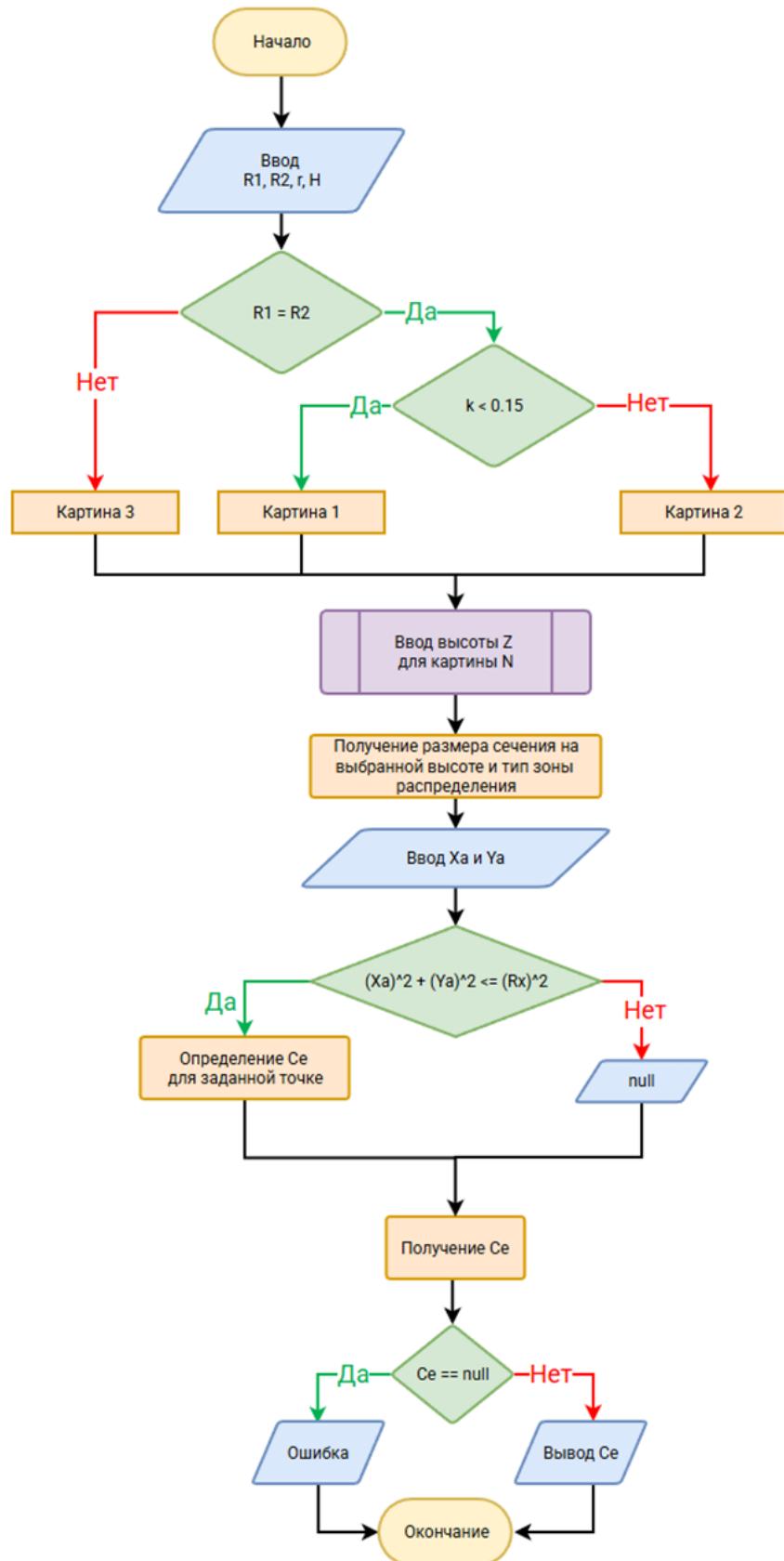


Рис. 13. Блок-схема основной программы



Заключение

Проведенное исследование позволило разработать эффективные алгоритмы автоматизированного расчета аэродинамических параметров глобоидных поверхностей. Представленные алгоритмы существенно сокращают трудоемкость расчетов по сравнению с традиционными ручными методами, обеспечивая точность и надежность результатов. Автоматизация процесса расчета имеет значительный потенциал для дальнейшего совершенствования методов анализа и оптимизации конструкций, обладающих сложной пространственной формой.

Полученные результаты представляют интерес для широкого круга исследователей и инженеров, занимающихся разработкой новых технологий и материалов. А применение предложенных подходов, в свою очередь, открывает новые возможности для повышения качества продукции, сокращения сроков реализации проектов, а также позволяет эффективно решать задачи научно-технического сопровождения современных инженерных проектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Численное моделирование воздействий ветра на высотные здания / В. Н. Алехин, А. А. Антипов, С. Н. Городилов [и др.]. // Современный город: проектирование, строительство и развитие (Ельцинские чтения) : сборник материалов международной научно-практической конференции по строительству и архитектуре, Екатеринбург, 23-24 апреля 2014 год. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. – С. 246–253.
2. Белостоцкий, А. М. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства. Учебное пособие / А. М. Белостоцкий, П. А. Акимов, И. Н. Афанасьева. – Москва : АСВ. – 2017. – 720 с. – ISBN 978-5-4323-0217-5.
3. Поддаева, О. И. Архитектурно-строительная аэродинамика / О. И. Поддаева, И. В. Дуничкин // Вестник МГСУ. – 2017. – Том 12, № 6 (105). – С. 602–609. – DOI 10.22227/1997-0935.2017.6.602-609.
4. Темам, Р. Уравнения Навье – Стокса. Теория и численный анализ / Р. Темам. – 2-е изд. – Москва : Мир, 1981. – 408 с.
5. Коптев, А. В. Уравнения Навье-Стокса. От теории к решению практических задач / А. В. Коптев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 7 (49). – С. 86–89. – DOI 10.18454/IRJ.2016.49.141.
6. Гринько, Е. А. Классификация аналитических поверхностей применительно к параметрической архитектуре и машиностроению / Е. А. Гринько // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия : Инженерные исследования. – 2018. – Том 19, № 4 – С. 438 – 456.
7. Sobolak, M. The methods of globoid surface modeling in CAD / M. Sobolak, P. E. Jagiełowicz // Archives of Materials Science and Engineering. – 2016. – № 81. – Р. 76–84.
8. Golebsky R. Globoid surface shaped with turning and envelope method / Golebsky R., Boral P. // MATEC Web of Conferences. – 2019. – № 254. – Р. 2–12.
9. Сутягин, А. В. Модель формирования винтовой поверхности глобоидного червяка ротационным точением принудительно вращаемым многолезвийным инструментом / А. В. Сутягин, Л. С. Малько, И. В. Трифанов // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8-4. – С. 823–828.
10. Сатанов, А. А. Физическое и численное моделирование аэродинамики большепролетной конструкции при различных направлениях ветрового потока / А. А. Сатанов // Строительная механика и конструкции. – 2023. – № 2 (37). – С. 87–97. – DOI 10.36622/VSTU.2023.37.2.009.
11. Воробьева, Ю. А. Цифровое моделирование ветровых потоков в жилой застройке / Воробьева Ю. А., Михайлова Т. В., Бурак Е. Э. // Вестник Белгородского



государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2022. – № 5. – С. 33–40.

12. Aly AM. Atmospheric boundary-layer simulation for the built environment: past, present and future // Building and Environment. – 2014. – Volume 75. – P. 206–221. – DOI 10.1016/j.

13. ANSYS, Inc. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 2021 R1 / ANSYS, Inc. – Canonsburg, PA, 2021. – 280 p.

14. ГОСТ Р 56728-2015. Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие здания : национальный стандарт Российской Федерации : Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 ноября 2015 г. № 1892-ст : введен впервые : дата введения 2016-05-01. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 12 с.

KHAZOV Pavel Alekseevich¹, doctor of technical sciences, associate professor of the chair of structural theory and technical mechanics; SHILOV Sergey Sergeevich, postgraduate student of the chair of structural theory and technical mechanics¹, design engineer²; MOLOSNOVA Natalia Dmitrievna¹, student

DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR AUTOMATIC DETERMINATION OF THE AERODYNAMIC PROPERTIES OF GLOBOID SURFACES

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (996) 563-68-33; e-mail: n.m.02@yandex.ru

Tel.: (951) 919-09-19; e-mail: khazov.nngasu@mail.ru

²«Stroy-snab» LLC.

33, Nesterova St., office 13, Nizhny Novgorod, 603000, Russia.

Tel: (961) 631-06-81; e-mail: sergey.shilov.1997@mail.ru

Key words: globoid, computer modeling, digital model, shape coefficient, aerodynamic coefficients, automation algorithms.

The article presents the results of developing a specialized computer-aided design (CAD) system engineered to determine the values and distribution patterns of aerodynamic parameters of globoid surfaces. The work involved computational modeling of the aerodynamic flow of a given geometry using the Ansys CFX software package. Based on the data obtained, the algorithmic structure of the main program and subprograms has been developed, presented in the form of detailed flowcharts.

REFERENCES

1. Alyokhin V. N., Antipin A. A., Gorodilov S. N. [et al.] Chislennoe modelirovaniye vozdeystviy veta na vysotnye zdaniya [Numerical modeling of wind effects on high-rise buildings]. Sovremennyi gorod: proektirovaniye, stroitelstvo i razvitiye (Eltsinskie chteniya) [Modern City: Design, Construction and Development (Yeltsin Readings)]: sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po stroitelstvu i arkhitekturye, Ekaterinburg, 23-24 aprelya 2014 g. Ekaterinburg, UrFU, 2014, P. 246–253.
2. Belostotskiy A. M., Akimov P. A., Afanaseva I. N. Vychislitel'naya aerodinamika v zadachakh stroitelstva [Computational Aerodynamics in Construction Problems]. Uchebnoe posobie. Moscow, ASV, 2017, 720 p. ISBN 978-5-4323-0217-5.



3. Poddaeva O. I., Dunichkin I. V. Arkhitekturno-stroitelnaya aerodinamika [Architectural and Construction Aerodynamics]. Vestnik MGSU [Vestnik MGSU]. 2017, Vol. 12, № 6 (105), P. 602–609. DOI 10.22227/1997-0935.2017.6.602-609.
4. Temam R. Uravneniya Nave – Stoksa. Teoriya i chislennoy analiz [Navier-Stokes Equations. Theory and Numerical Analysis]. 2-e izd. Moscow, Mir, 1981, 408 p.
5. Koptev A. V. Uravneniya Nave-Stoksa. Ot teorii k resheniyu prakticheskikh zadach [Navier-Stokes Equations. From Theory to Solving Practical Problems]. Mezhdunarodny nauchno-issledovatelskiy zhurnal [International Research Journal]. 2016, № 7 (49), P. 86–89. DOI 10.18454/IRJ.2016.49.141.
6. Grinko E. A. Klassifikatsiya analiticheskikh poverkhnostey primenitelno k parametricheskoy arkhitektury i mashinostroeniyu [Classification of analytical surfaces in relation to parametric architecture and mechanical engineering]. Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya : Inzhenernye issledovaniya [RUDN Journal of Engineering Research]. 2018, Vol. 19, № 4, P. 438–456.
7. Sobolak M., Jagielowicz P. E. The methods of globoid surface modeling in CAD. Archives of Materials Science and Engineering. 2016. № 81. P. 76–84.
8. Golebsky R., Boral P. Globoid surface shaped with turning and envelope method. MATEC Web of Conferences. 2019. № 254. P. 2–12.
9. Sutyagin A. V., Malko L. S., Trifanov I. V. Model formirovaniya vintovoy poverkhnosti globoidnogo chervyaka rotatsionnym tocheniem prinuditelno vrashchayemym mnogolezvivnym instrumentom [Model of forming the helical surface of a globoid worm by rotary turning with a forcibly rotated multi-edge tool]. Fundamentalnye issledovaniya [Fundamental Research]. 2014, № 8-4, P. 823–828.
10. Satanov A. A. Fizicheskoe i chislennoe modelirovaniye aerodinamiki bolsheproletnoy konstruktsii pri razlichnykh napravleniyakh vetrovogo potoka [Physical and numerical modeling of the aerodynamics of a large-span structure under different wind flow directions]. Stroitelnaya mekhanika i konstruktsii [Structural Mechanics and Constructions]. 2023, № 2 (37), P. 87–97. DOI 10.36622/VSTU.2023.37.2.009.
11. Vorobeva Yu. A., Mikhaylova T. V., Burak E. E. Tsifrovoe modelirovaniye vetrovykh potokov v zhiloy zastroyke [Digital modeling of wind flows in residential development]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova [Bulletin of the V.G. Shukhov Belgorod State Technological University]. 2022, № 5, P. 33–40.
12. Aly A. M. Atmospheric boundary-layer simulation for the built environment: past, present and future. Building and Environment. 2014. Volume 75. P. 206–221. DOI 10.1016/j.
13. ANSYS, Inc. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 2021 R1 / ANSYS, Inc. Canonsburg, PA, 2021. 280 p.
14. GOST R 56728-2015. Zdaniya i sooruzheniya. Metodika opredeleniya vetrovykh nagruzok na ogradzhdushchye zdaniya [Buildings and structures. Method for determining wind loads on building envelopes]: natsionalny standart Rossiyskoy Federatsii : Utverzhden i vveden v deystvie Prikazom Federalnogo agentstva po tekhnicheskому regulirovaniyu i metrologii ot 19 noyabrya 2015 g. No 1892-st : vveden vpervyye : data vvedeniya 2016-05-01. Moscow, Standartinform, 2016, 12 p.

© П. А. Хазов, С. С. Шилов, Н. Д. Молоснова, 2025

Получено: 08.10.2025 г.