



УДК 624.014.9:004.942

П. А. ХАЗОВ, д-р техн. наук, доц., проф. кафедры теории сооружений и технической механики; **С. С. ШИЛОВ**, соискатель ученой степени кандидата технических наук кафедры теории сооружений и технической механики¹, инженерконструктор²; **Н. Д. МОЛОСНОВА**, студент; **А. К. СИТНИКОВА**, аспирант кафедры теории сооружений и технической механики

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГЛОБОИДНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ПРИМЕРЕ ЗДАНИЯ В ФОРМЕ ГИПЕРБОЛОИДА ВРАЩЕНИЯ

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

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

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

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

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

²ООО «Строй-снаб».

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

Ключевые слова: гиперboloид вращения, глобоидная поверхность, верификация, *Ansys CFX*, вычислительная гидродинамика, ветровые нагрузки, специализированное программное обеспечение.

*В статье представлены результаты исследования, в ходе которого сравнивались характеристики специализированной системы для расчета аэродинамических параметров глобоидных поверхностей с данными, полученными в результате моделирования в *Ansys CFX* для здания в форме гиперboloида вращения. Установлено, что в лобовой зоне и на участках безотрывного обтекания сходимость результатов высокая, однако в подветренной области наблюдаются расхождения, связанные с недостаточным охватом геометрических параметров в обучающей выборке и упрощенным учетом трехмерных турбулентных эффектов. Предложены пути дальнейшего развития: расширение параметрической базы и переход к гибридным методам расчета.*

Введение

Задача определения аэродинамических коэффициентов для зданий, геометрическая форма которых описывается гиперboloидом вращения, сопряжена со значительными сложностями, обусловленными нелинейным характером обтекания поверхностей с переменной гауссовой кривизной. Применимость нормативных методик в данном случае оказывается ограниченной.

На стыке возрастающей востребованности объектов со сложными пространственными формами, характеризующимися двоякой кривизной, в современном строительстве и машиностроении [1] и объективных ограничений применимости нормативных методик для их расчета возникает исследовательская проблема, решение которой представляет большой научный интерес.

При проведении комплексного исследования, объединяющего натурные физические эксперименты и численное моделирование, была разработана специализированная вычислительная Система расчета аэродинамических параметров глобоидных поверхностей [2–4]. Данная система ориентирована на автоматизированное получение распределения ветрового давления по поверхности зданий сложной криволинейной геометрии. Однако для ее практического применения необходимо подтверждение корректности выдаваемых результатов.

В качестве объекта исследования выбрано здание, архитектурная форма которого представляет собой гиперboloид вращения. Такая геометрия, обладающая двойкой кривизной, характеризуется сложным характером обтекания воздушным потоком с формированием зон отрыва, присоединения и вихревых структур, что делает ее удобным тестом для верификации специализированных алгоритмов.

Цель данной работы: проведение верификации результатов, получаемых с помощью специализированной Системы расчета аэродинамических параметров глобоидных поверхностей, путем их сопоставления с данными моделирования в комплексе *Ansys CFX*. Для этого выполняется сравнительный анализ распределения аэродинамических коэффициентов по поверхности гиперboloида вращения, рассчитанных в обоих инструментах, что позволяет оценить точность и применимость разработанной системы для инженерных задач.

Методология проведения исследования

Система расчета аэродинамических параметров глобоидных поверхностей представляет собой специализированное программное обеспечение, созданное в рамках работы над разработкой проекта рассматриваемого здания. Ее разработка включала исследование порядка 28 цифровых моделей глобоидных поверхностей с использованием ПК *Ansys CFX* [2–4]; тем актуальнее становится верификация результатов исследования на конкретном примере здания схожей формы.

При анализе результатов компьютерного моделирования аэродинамических особенностей поверхности глобоида было установлено, что имеются 3 характерные картины распределения искомых параметров [2]. Форма здания, рассматриваемого в настоящем исследовании, подходит под картину распределения 3 (рис. 1), при $R1 \neq R2$.

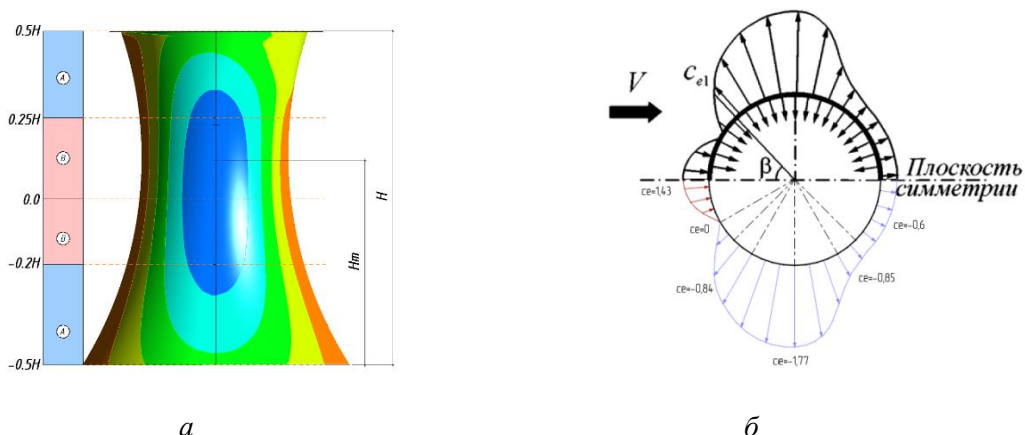


Рис. 1. Картина распределения аэродинамических коэффициентов, согласно исследованию: а – по вертикали; б – сгущение сетки вблизи объекта исследования



В частности, по укрупненным показателям расчета исследованных моделей вся поверхность оболочки, как по горизонтали, так и по вертикали разбита на несколько характерных секторов. Значение коэффициента в этом случае принимается как среднее между экстремальными на границах этих зон. В общем случае, частично рассмотренном также в прил. В.1.12 СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», наблюдается плавное изменение параметра, связанное с увеличением центрального угла координаты расположения точки на поверхности оболочки [2, 5].

Интерфейс программы прост и интуитивно понятен, что делает ее доступным инструментом, не требующим предварительного изучения для комфортной работы. На главном экране предлагается ввести четыре основных геометрических параметра оболочки ($R1$, $R2$, r и H), которые легко измерить или вычислить математически [2].

Моделирование в *Ansys CFX*

Геометрическая модель здания характеризуется малой кривизной образующих, что является отличительной чертой гиперболоидных конструкций. Данная особенность позволила с определенной степенью допущения привести исходную форму к глобоидной поверхности для упрощения расчетов в специализированной системе. Верификация такого допущения стала одной из ключевых задач исследования.

Процесс компьютерного моделирования начинается с построения расчетной области, имитирующей воздушное пространство, окружающее исследуемый объект. Поскольку объект исследования в плане (плоскости ортогональной направлению потока) имеет форму круга, достаточно рассмотреть одно направление ветрового воздействия.

Расчетная область (рис. 2, 3) задана в форме прямоугольного параллелепипеда со следующими размерами: длина составляет $18D$, ширина – $10D$, а высота – $5H$ (где D – наибольший размер формы в плане, H – высота формы) [6–9].

В качестве начальных условий задается профиль скорости ветра, постоянный по высоте. Значение скорости определяется из формулы [10]:

$$v = \left(\frac{w_0}{0,43} \right)^{0,5} = \left(\frac{230,0}{0,43} \right)^{0,5} = 23,1 \frac{м}{с},$$

где: v – нормативная скорость ветра – стационарная составляющая скорости горизонтального перемещения воздушных масс,

w_0 – нормативное значение ветрового давления.

Также задаются граничные условия [9], соответствующие равномерному движению ветрового потока (табл.).

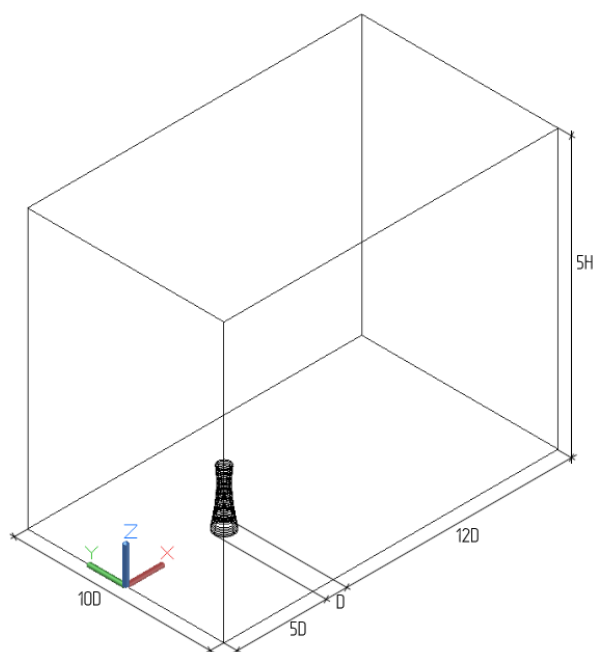
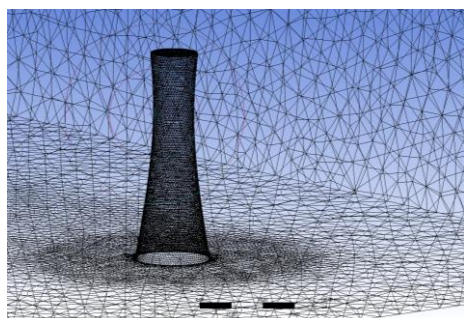
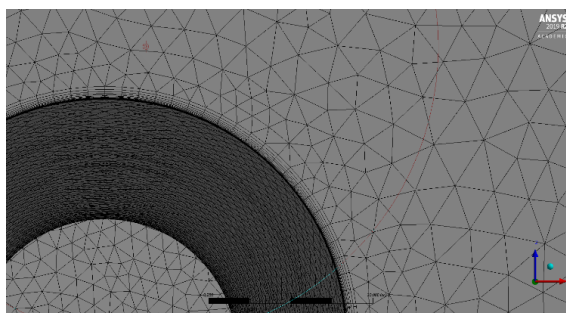


Рис. 2. Моделирование рабочей области



a



б

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

Таблица

Задание начальных и граничных условий

Граница	Тип условия
<i>Inlet</i> (вход)	Профиль скорости ветра, параметры турбулентности
<i>Outlet</i> (выход)	Нулевое избыточное давление, параметры турбулентности
Верхняя граница	Условие симметрии
Нижняя граница, поверхность объекта	Условие непроницаемой стенки

В ходе вычислительного эксперимента (рис. 4) была зафиксирована особенность сходимости итерационного процесса: в данном случае наблюдалось

сохранение остаточных колебаний, с ненулевой амплитудой, тогда как в классическом случае отклонение, характерное для начальных итераций, полностью затухает.

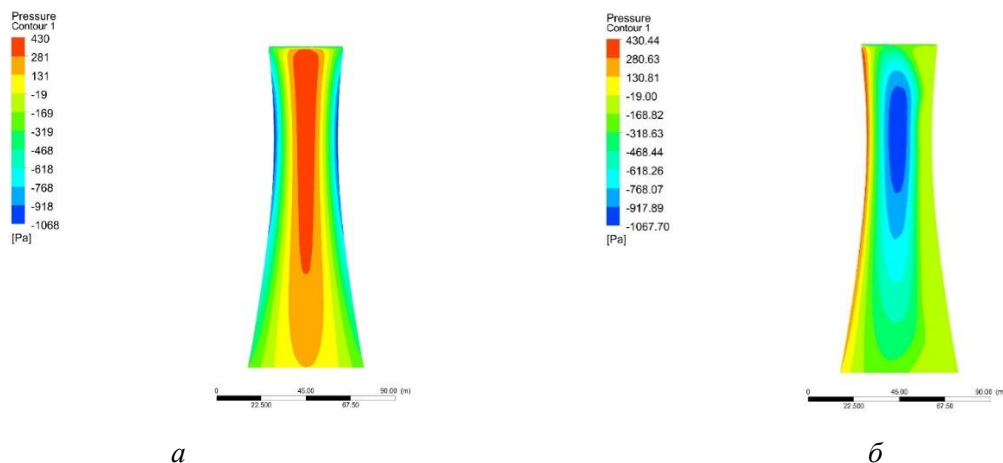


Рис. 4. Распределение ветрового давления по поверхности формы (ограждающим конструкциям здания): *а* – со стороны основного ветрового потока (фронтальная часть); *б* – боковое обтекание (под углом 90° к направлению потока)

Данное явление позволяет выдвинуть предположение о формировании в расчетной области устойчивой автоколебательной структуры течения (рис. 5). Вероятной причиной этого может служить то, что в определенный момент времени часть частиц потока попадает в зону взаимодействия одновременно с нижней (расширенной) и верхней частями гиперболоидной поверхности, в результате чего они оказываются вовлечены в квазипериодический цикл отражения, не покидая область неустойчивого равновесия.

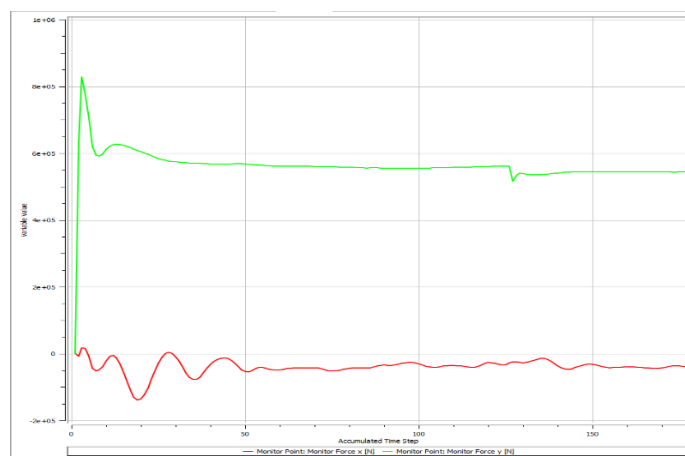


Рис. 5. Иллюстрация итерационного процесса решения в ПБК *Ansys CFX*

В ходе моделирования введением дополнительной переменной для упрощения вывода результатов была получена картина распределения аэродинамических коэффициентов внешнего ветрового давления по поверхности рассматриваемой оболочки (рис. 6) [9]. Полученные данные численно, а также

графически сравнимы с приведенными в методике расчета в прил. В.1.12 СП 20.13330.2016 [5], что дополнительно подтверждает достоверность расчета.

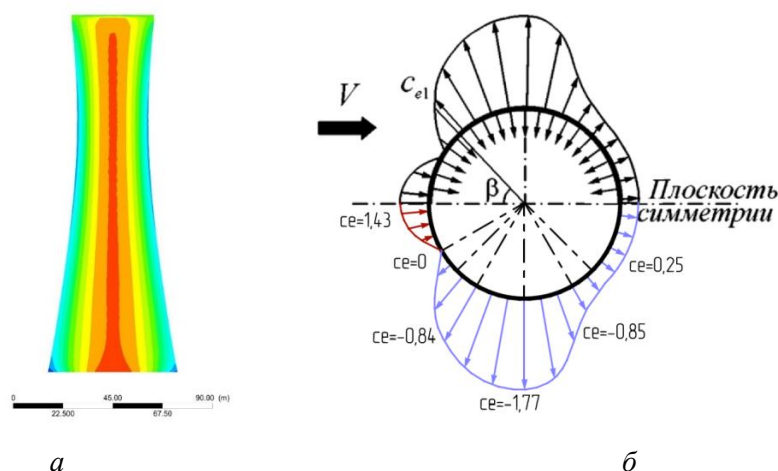


Рис. 6. Картины распределения аэродинамических коэффициентов: *а* – полученная в ходе компьютерного моделирования; *б* – сравнение норматива, приведенного в прил. В.1.12 СП 20.13330.2016 (сверху) с полученными данными (снизу)

Результаты сравнительного анализа и практическая оценка системы

С целью определения соответствия разработанной системы эталону, сравнительный анализ распределения аэродинамических коэффициентов был выполнен для меридиональных линий поверхности и трех характерных сечений: на отм. +9,900, +80,100 и +150,300 м (рис. 7).

Критическое расхождение наблюдается на отметке +80,100 в пределах зоны С. В то время как расчет в ПБК *Ansys CFX* демонстрирует сохранение отрицательных значений давления на подветренной стороне, результаты, полученные с помощью Системы автоматизированного расчета, указывают на возникновение здесь обратного напора.

Причиной этого может являться недостаточная точность аппроксимации исходной геометрии гиперboloида вращения глобоидной поверхностью. Учитывая, что алгоритмы системы базируются на обширной базе данных исследования обтекания в том же ПБК *Ansys CFX*, возможно, причину следует искать в явлении экстраполяции. Несмотря на близость форм, на данном уровне могли присутствовать локальные особенности геометрии, которые и инициировали ранний срыв потока или иную структуру присоединения вихрей, что не было учтено в обобщенной модели, построенной на более гладких или пропорционально иных эталонах [7, 8].

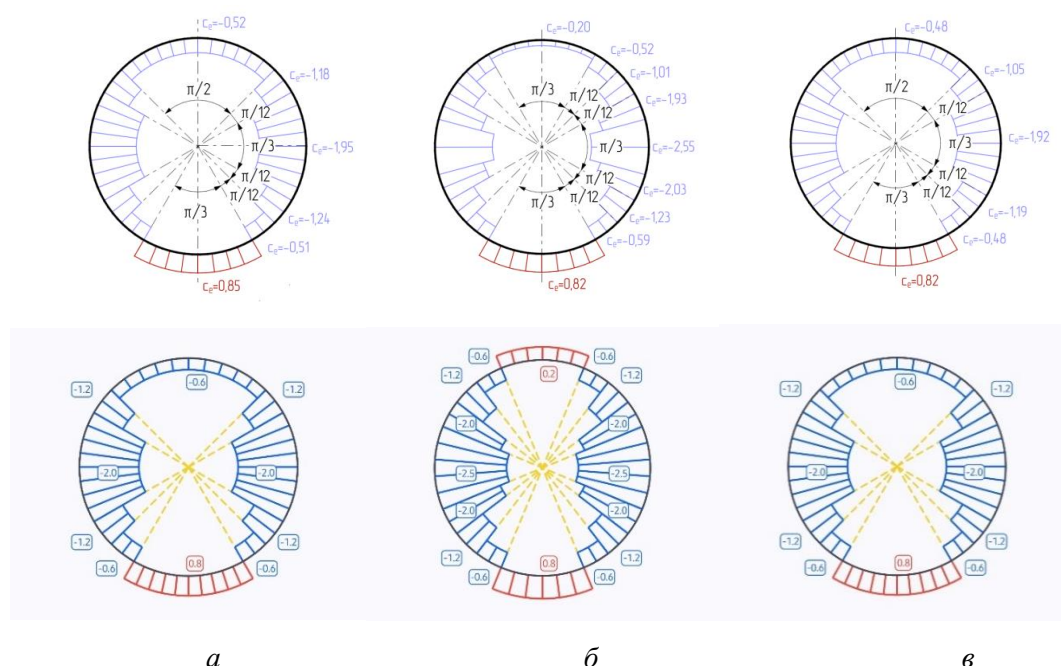


Рис. 7. Картины распределения аэродинамических коэффициентов по расчету: сверху – в ПБК *Ansys CFX*; снизу – в автоматизированной системе: *а* – на отм. +9,900; *б* – на отм. +80,100; *в* – на отм. +150,300

Вместе с тем, система обладает несомненной практической ценностью. Она позволяет стандартизировать определение ветровых нагрузок для поверхностей, не регламентированных нормативными документами (в частности, СП 20.13330.2016 [5]). Универсальность подхода заключается в возможности получения картины давлений для широкого круга глобидных форм без повторения трудоемкого цикла геометрического и сеточного моделирования. Простота использования и стандартизация существенно сокращают время предпроектных изысканий.

Инженер получает возможность оперативно оценивать аэродинамическое качество формы на ранних этапах проектирования, когда выполнение полноценного расчета в *Ansys CFX* нецелесообразно из-за большого количества итераций. Таким образом, система выступает эффективным инструментом экспресс-оценки, дополняя этап детального *CFD*-моделирования.

Заключение

Текущая версия системы ограничена при обработке более сложных и геометрически нестационарных форм из-за принятых упрощений в численных методах. Это накладывает требования на применение и создает поле для дальнейших исследований. Альтернативный путь использования – переход к гибридным методам, где система определяет безотрывные зоны и общий вид распределения коэффициентов, а локальные особенности рассчитываются по полной *CFD*-модели.

Таким образом, при выявленных ограничениях в зонах отрывных течений разработанная система обладает несомненной практической ценностью как стандартизированный инструмент экспресс-анализа, органично дополняющий тяжелые *CFD*-расчеты.



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Численное моделирование воздействий ветра на высотные здания / В. Н. Алехин, А. А. Антипин, 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. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. – С. 246–253.
2. Хазов, П. А. Разработка системы автоматизированного определения аэродинамических параметров глобоидных поверхностей / П. А. Хазов, С. С. Шилов, Н. Д. Молоснова // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2025. – № 4. – С. 329–340.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2025666216 Российская Федерация. Система автоматизированного расчета аэродинамических коэффициентов на поверхность двоякой кривизны : № 2025666216 : заявл. 05.06.2025 : опубли. 24.06.2025 / Шилов С. С., Хазов П. А., Шилов А. С., Симонов А. В. ; заявитель Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2026612411 Российская Федерация. Система автоматизированного расчета аэродинамических параметров глобоидных поверхностей : № 2026612411 : заявл. 15.01.2026 : опубли. 27.01.2026 / С. С. Шилов, П. А. Хазов, А. С. Шилов, Н. Д. Молоснова; заявитель Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет.
5. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия : свод правил : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 3 декабря 2016 г. № 891/пр : актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* : дата введения 4 июня 2017 г. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (дата обращения: 24.03.2026). – Текст : электронный.
6. Сатанов, А. А. Физическое и численное моделирование аэродинамики большепролетной конструкции при различных направлениях ветрового потока / А. А. Сатанов // Строительная механика и конструкции / Воронежский государственный технический университет. – Воронеж, 2023. – Т. 2, № 37. – С. 87–97. – URL: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.37.2.009>.
7. Воробьева, Ю. А. Цифровое моделирование ветровых потоков в жилой застройке / Ю. А. Воробьева // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова / Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – Белгород, 2022. – № 5. – С. 33–40.
8. Aly, A. M. Atmospheric boundary-layer simulation for the built environment: Past, present and future / A. M. Aly // Building and Environment. – 2014. – Vol. 75. – P. 206–221.
9. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 2021 R1. – Canonsburg, PA, 2021. – 280 p.
10. ГОСТ Р 56728-2015. Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие конструкции : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 ноября 2015 г. № 1892-ст : дата введения 2016-05-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200127225?ysclid=mq97bsbthq937684609> (дата обращения: 12.02.2026). – Текст : электронный.



KHAZOV Pavel Alekseevich, doctor of technical sciences, associate professor of the chair of structural theory and technical mechanics; SHILOV Sergey Sergeevich, applicant for candidate of technical sciences of the chair of structural theory and technical mechanics¹, design engineer²; MOLOSNOVA Natalia Dmitrievna, student; SITNIKOVA Anna Konstantinovna, postgraduate student of structural theory and technical mechanics

ACCURACY EVALUATION OF THE AUTOMATED SYSTEM FOR CALCULATING THE AERODYNAMIC PARAMETERS OF GLOBOID SURFACES: A CASE STUDY OF A HYPERBOLOID OF ROTATION STRUCTURE

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

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

²Stroy-snab LLC.

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

Key words: hyperboloid of rotation, globoid surface, verification, Ansys CFX, computational fluid dynamics, wind loads, specialized software.

The article outlines the results of a study comparing the characteristics of a specialized system for calculating the aerodynamic parameters of globoid surfaces with data obtained as a result of modeling in Ansys CFX for a building in the form of a hyperboloid of rotation. It was found that the convergence of the results is high in the frontal zone and in the areas of attached flow; however, discrepancies are observed in the leeward region due to insufficient coverage of geometric parameters in the training sample and simplified consideration of three-dimensional turbulent effects. Ways of further development are proposed: expansion of the parametric base and transition to hybrid computational methods.

REFERENCES

1. Alekhin V. N., Antipin A. A., Gorodilov S. N. Chislennoe modelirovanie vozddeystviy vetra na vysotnye zdaniya [Numerical simulation of wind effects on high-rise buildings]. Sovremennyy gorod: proektirovanie, stroitelstvo i razvitie (Eltsinskie chteniya) [Modern city: design, construction and development (Yeltsin readings)]. materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po stroitelstvu i arkhitekture, Ekaterinburg, 23-24 aprelya 2014. Ekaterinburg, UrFU, 2014, P. 246–253.

2. Khazov P. A., Shilov S. S., Molosnova N. D. Razrabotka sistemy avtomatizirovannogo opredeleniya aerodinamicheskikh parametrov globovidnykh poverkhnostey [Development of an automated system for determining the aerodynamic parameters of globoid surfaces]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2025, № 4, P. 329–340.

3. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2025666216 Rossiyskaya Federatsiya. Sistema avtomatizirovannogo rascheta aerodinamicheskikh koeffitsientov na poverkhnost' dvoyakoy krivizny [Automated system for calculating aerodynamic coefficients on a double-curvature surface] : № 2025666216 : zayavl. 05.06.2025 : opubl. 24.06.2025. Shilov S. S., Khazov P. A., Shilov A. S., Simonov A. V. ; zayavitel Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t.



4. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2026612411 Rossiyskaya Federatsiya. Sistema avtomatizirovannogo rascheta aerodinamicheskikh parametrov globovidnykh poverkhnostey [Automated system for calculating the aerodynamic parameters of globoid surfaces] : № 2026612411 : zayavl. 15.01.2026 : opubl. 27.01.2026. Shilov S. S., Khazov P. A., Shilov A. S., Molosnova N. D. ; zayavitel Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t.
5. SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya [Loads and impacts]. Svod pravil : aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85* : utverzhden prikazom Ministerstva stroitelstva i zhilishchno-kommunalnogo khozyaystva Rossiyskoy Federatsii ot 3 dekablya 2016 g. № 891/pr : data vved. 04.06.2017. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044318> (accessed: 24.03.2026).
6. Satanov A. A. Fizicheskoe i chislennoe modelirovanie aerodinamiki bolsheproletnoy konstruksii pri razlichnykh napravleniyakh vetrovogo potoka [Physical and numerical modeling of the aerodynamics of a long-span structure under different wind flow directions]. Stroitel'naya mekhanika i konstruksii [Structural Mechanics and Structures]. Voronezh. gos. tekhn. un-t. Voronezh, 2023, Vol. 2, № 37, P. 87–97. URL: <https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.37.2.009>.
7. Vorobeva Yu. A. Tsifrovoe modelirovanie vetrovykh potokov v zhiloy zastroyke [Digital simulation of wind flows in residential development]. Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V. G. Shukhova [Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov]. Belgorod. gos. tekhn. un-t. im. V. G. Shukhova. Belgorod, 2022, № 5, P. 33–40.
8. Aly A. M. Atmospheric boundary-layer simulation for the built environment: Past, present and future. Building and Environment. 2014, Vol. 75, P. 206–221.
9. ANSYS CFX-Solver Theory Guide. Release 2021 R1. Canonsburg, PA, 2021. 280 p.
10. GOST R 56728-2015. Zdaniya i sooruzheniya. Metodika opredeleniya vetrovykh nagruzok na ograzhdayushchie konstruksii [Buildings and structures. Method for determining wind loads on enclosing structures] : utverzhden i vveden v deystvie Prikazom Federalnogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 19 noyabrya 2015 g. № 1892-st : data vved. 2016-05-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200127225?ysclid=mq97bsbthq937684609> (accessed: 12.02.2026).

© П. А. Хазов, С. С. Шилов, М. Д. Молоснова, А. К. Ситникова, 2026

Получено: 30.04.2026 г.