



## МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ И КЛИМАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ОБЪЕКТЫ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

А.А. Егоркин<sup>1,2</sup>, В.П. Евстигнеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

E-mail: [egorkin1974@yandex.ru](mailto:egorkin1974@yandex.ru)

Географические особенности Крымского полуострова определяют проявление ряда опасных метеорологических и климатических факторов, которые могут оказывать негативное воздействие на объекты культурного наследия. Среди таких явлений особенно выделяются сильные ветры со шквалом. Работа посвящена оценке такого ветрового воздействия на Базилику 1935 года, расположенную на территории музея-заповедника «Херсонес Таврический» как пример объекта культурного наследия Крыма. В основе разработки подходов использовались методы вычислительной гидродинамики. Для моделирования был выбран период с наиболее неблагоприятными метеорологическими и климатическими условиями. Это было сделано для того, чтобы оценить максимальную нагрузку на объект исследования.

**Ключевые слова:** атмосфера, метеорология, климатология, опасные явления.

Поступила в редакцию: 12.10.2023. После доработки: 02.11.2023.

**Введение.** Перспективным методом моделирования для исследования вопросов безопасности строений и сооружений, подвергающихся метеорологическому и климатическому воздействию в настоящее время, является применение методов вычислительной газодинамики (CFD-методов) (Computational Fluid Dynamics) [1–13]. Моделирование с использованием CFD-методов возможно использовать для имитации полномасштабного эксперимента с определенными ограничениями и допущениями. Методы вычислительной гидродинамики могут предоставить богатый объем информации о динамике гипотетической опасной ситуации, её последствиях и оценке рисков.

**Цель и постановка задач.** Цель данной работы – разработать методические подходы к оценке метеорологической и климатической нагрузки на объекты культурного наследия Крымского полуострова и провести частичную оценку одного из объектов.

**Материалы и методы.** Из анализа литературных данных [1–13], можно составить следующую последовательность действий для выполнения численных

исследований по оценке метеорологической и климатической нагрузки на объекты культурного и исторического наследия:

1. Постановка задачи исследования.
2. Выбор метода расчета.
3. Разработка физической модели.
4. Выбор расчетного кода.
5. Выбор и построение расчетной области.
6. Выбор компьютерной модели.

Ветер является одной из главных климатических причин приморских территорий, оказывающих доминирующее воздействие на образование климата, поэтому данные территории являются зонами с повышенной скоростью ветра. Оценка воздействия ветрового режима выступает одной из главных архитектурно-климатических задач.

В связи с этим, основные усилия по моделированию процессов воздействия метеорологической и климатической нагрузки на отдельные объекты культурного и исторического наследия направлены на оценку ветрового воздействия. В качестве объекта исследования был выбран объект – «Базилика 1935

года", расположенная на территории музея-заповедника «Херсонес Таврический». Для определения направлений исследования были проведены ознакомление и фотографирование «Базилики». Снимок «Базилики» представлен на рис. 1.

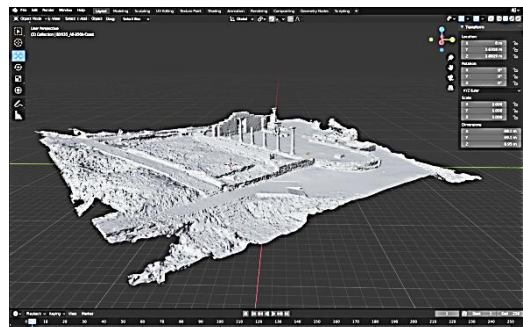


**Рис. 1.** Снимок внешнего вида исследуемого объекта  
**Fig. 1.** Snapshot of the appearance of the object under study

По результатам натурального осмотра и изучения снимков можно сделать вывод о наличии глубоких трещин на колоннах и кладке фронтона «Базилики» (первая и вторая ближние колонны на снимке). Данные повреждения являются объектом исследования на стойкость конструкции к ветровому воздействию.

Для оценки геометрических параметров объекта было проведено фотограмметрическое моделирование. Обработка и визуализация результатов фотограмметрии проводилась с помощью свободно распространяемого профессионального программного обеспечения «Blender» для работы с графикой (рис. 2). По результатам моделирования была получена трехмерная полигональная модель «Базилики».

Построение модели дало возможность определить размеры входящих в неё составных элементов и в дальнейшем, по этим размерам, построить трехмерную CAD – модель. CAD-системы (computer-aided design) – это способ создания цифрового макета объекта.



**Рис. 2.** Модель исследуемой области, выполненная по данным фотограмметрии, и обработанная в программе «Blender»  
**Fig. 2.** A model of the studied area, made according to photogrammetry data and processed in the Blender program

В качестве инструмента для проведения исследования был выбран хорошо себя зарекомендовавший программный продукт ANSYS FLUENT (студенческая версия), который использовался для выполнения расчетов нестационарного потока на основе метода конечных объемов для решения уравнений гидрогазодинамических потоков. Построение трехмерной CAD – модели расчетной области осуществлялось с использованием инструментов, входящих в программный продукт ANSYS FLUENT.

Исследование было основано на рекомендациях обзора использования CFD-моделей для моделирования воздействия внешней среды на различные архитектурные объекты [14], а также на основе «Руководства по наилучшей практике для моделирования потоков CFD в городской среде» [15] и с использованием данных «Руководства Архитектурного института Японии (AIJ) по практическому применению CFD» [16]. Построение объемной геометрической модели исследуемой области выполнялось на основе исходной модели, построенной по данным фотограмметрии (рис. 2). Смоделированная расчетная область показана на рис. 3.

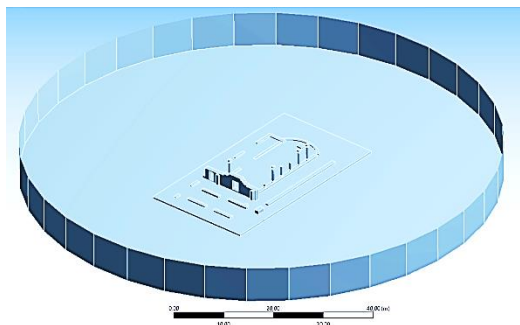


Рис. 3. Расчетная область объекта исследования

Fig. 3. Estimated area of the research object

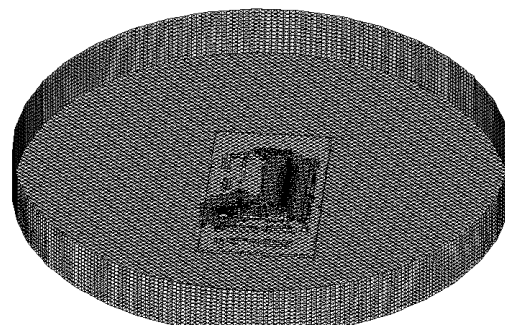
При создании трехмерной геометрической модели, которая представляет собой полномасштабную модель объекта, детализация выбрана в соответствии с поставленной задачей - определение только интегральных аэродинамических нагрузок на сооружения, что также допускает разумное упрощение геометрических форм сооружений. Расчетный воздушный домен был сформирован следующим образом: после создания в программном комплексе объемной геометрической модели архитектурного комплекса «Базилика», он «вычитается» из модели воздушного пространства.

Расчетная область была разбита на элементы сетки с использованием многогранных элементов и состоит в среднем из 2,15 миллиона ячеек с применением метода построения сетки «CutCell». Вид расчетной области с визуализацией построения сеточной модели представлен на рис. 4.

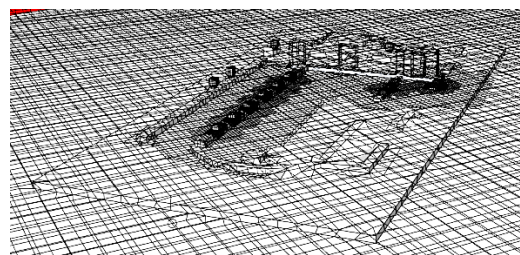
Максимальный размер сеточного элемента составляет 0,86 метра. В ближней зоне смоделировано сгущение сетки около каждого из строений архитектурного комплекса, элементы сетки имеют наименьший размер 0,1–0,2 м.

Области расчета присваиваются следующие физические параметры: тип среды – несжимаемый воздух при температуре 4°C и давление 1 атм с учетом силы гравитации.

Температура среды была выбрана как средняя для исследуемого периода времени и считалась постоянной.



а)



б)

Рис. 4. Сетка конечных элементов: а) – общий вид, б) – вблизи строений

Fig. 4. The grid of finite elements: а) – general view, б) – near buildings

Граничные условия и расчетная область с обозначенными граничными условиями для угла атаки ветра 360° приведены на рис. 5.

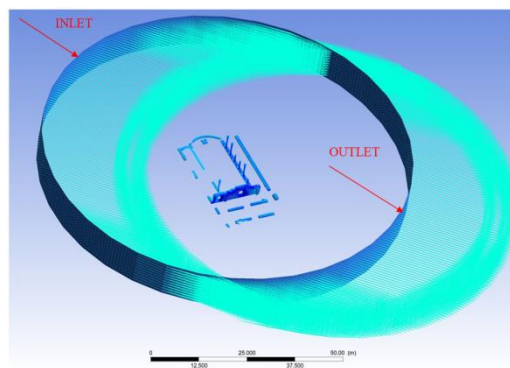


Рис. 5. Пример векторного профиля скорости на входе и выходе из расчетной области

Fig. 5. Example of a vector velocity profile at the entrance and exit from the computational domain

В расчетной области задавались следующие граничные условия:

1. В качестве характеристик набегающего потока (граничное условие на «входе» (INLET)) задавался профиль

скорости ветра и характеристика турбулентности (кинетическая энергия турбулентности и энергии диссипации, интенсивность турбулентности и масштаб вихря).

Для исследования был проведен анализ и выбраны экстремальные данные о климатических параметрах, связанных со штормовыми явлениями в период с 1976 по 1982 годы. К таким данным можно отнести максимальную скорость ветра, равную 23 м/с, наблюдаемую за исследуемый период. Исследования проводились для восьми румбов направлений ветра.

2. На «выходе» (OUTLET) назначались «мягкие» граничные условия с нулевыми дополнительными давлениями и такими же параметрами турбулентности, как и на «входе».

3. На верхней границе области задавалось условие симметрии потока.

4. На нижней границе области и на всех строениях задавалось условие «стенки», исключающее проникновение вещества через поверхность.

Созданная модель, используемая в этом исследовании, решает усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) с применением модели турбулентности k-ε.

Модель хорошо зарекомендовала себя при моделировании городских ветровых потоков [17, 18]. В основе этого метода лежит полуэмпирический подход, основанный на разложении скорости на осредненную во времени и пульсационную составляющие. В результате соответствующих преобразований уравнений Навье-Стокса появляются дополнительные неизвестные (так называемые сдвиговые «Рейнольдсовы» напряжения). Система получается незамкнутой и требует дополнительных уравнений – «моделей турбулентности».

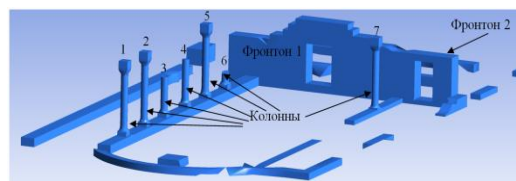
Физическое время счета для нестационарных расчетов выбиралось так,

чтобы поток прошел всю расчетную область не менее 3 раз.

Применялась схема адвекции высокого разрешения и неявная схема интегрирования по времени второго порядка. Критерием сходимости и окончания счета для нестационарной постановки является достижение заданного уровня максимальных невязок  $10^{-3}$ – $10^{-5}$ . Максимальное количество итераций на шаге принималось равным  $5 \div 10$ .

**Полученные результаты.** Для археологического комплекса были определены расчетные средние и максимальные составляющие ветровых нагрузок на конструкции при восьми направлениях ветра.

Получены перечисленные ниже результаты многовариантных расчетных исследований по определению ветровых нагрузок на исследуемые элементы архитектурного комплекса «Базилика». Исследуемые элементы представлены на рис. 6.

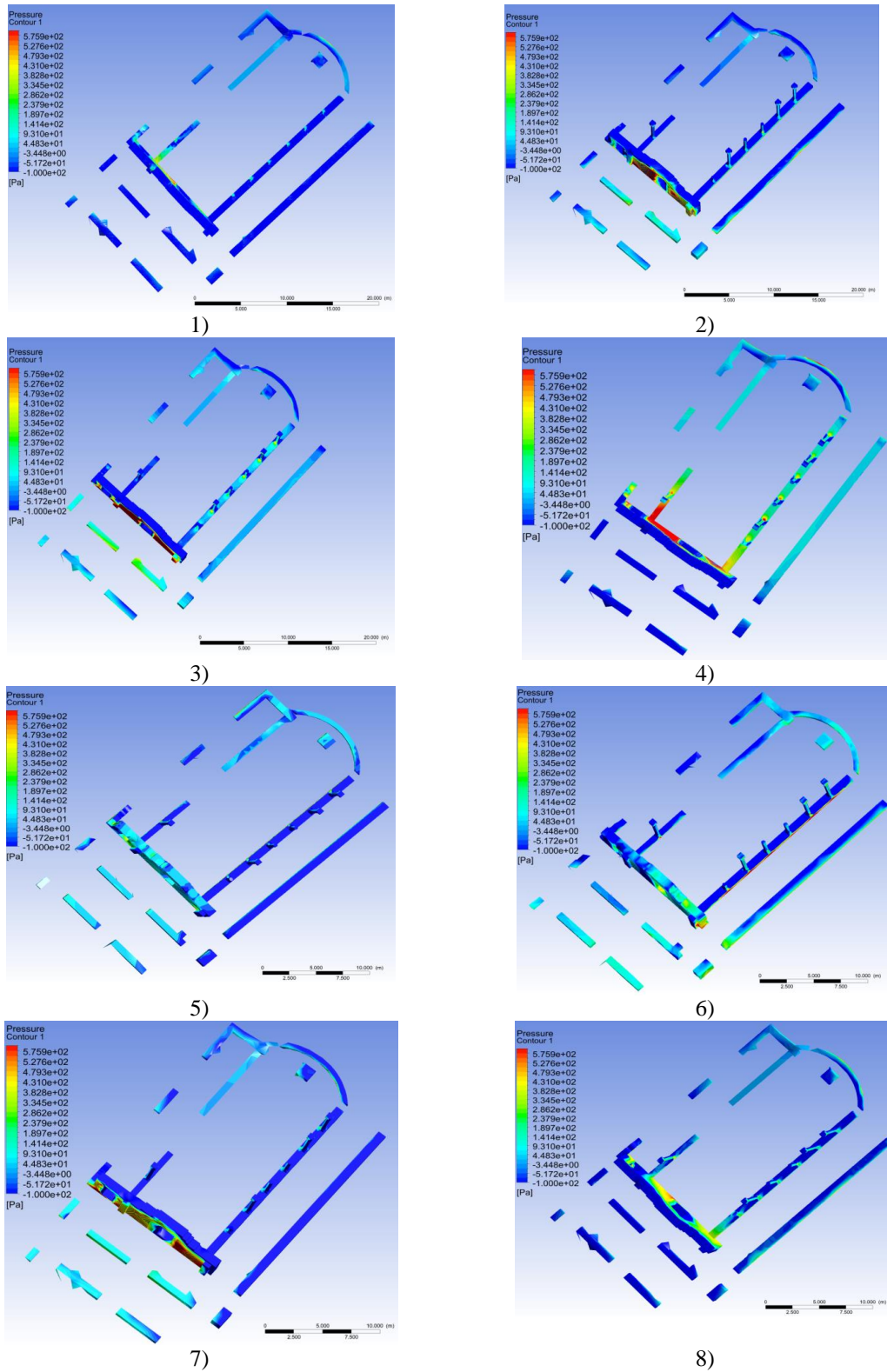


**Рис. 6.** Исследуемые элементы архитектурного комплекса  
**Fig. 6.** The studied elements of the architectural complex

Многовариантные расчетные исследования проводились с учетом изменения направления ветра.

На рис. 7 представлены результаты компьютерного моделирования ветровых воздействий на конструкции.

Результаты компьютерного моделирования позволяют выделить зоны с наибольшим ветровым воздействием на конструкции архитектурного комплекса. Зоны обозначены красным цветом.



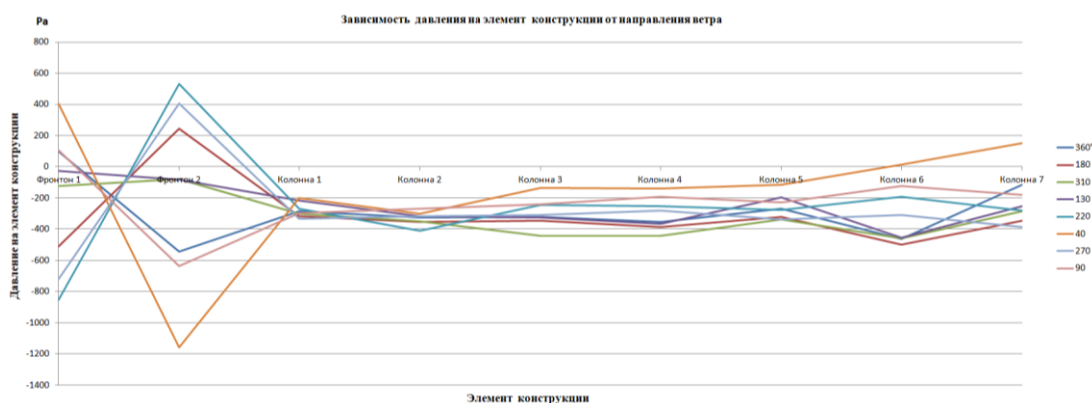
**Рис. 7.** Визуализация распределения давления на различных элементах исследуемой области и направлениях ветра: 1) - 360°, 2) - 180°, 3) - 220°, 4) - 40°, 5) - 310°, 6) - 130°, 7) - 270°, 8) - 90°

**Fig. 7.** Visualization of distributed pressures on various elements and wind directions: 1) - 360°, 2) - 180°, 3) - 220°, 4) - 40°, 5) - 310°, 6) - 130°, 7) - 270°, 8) - 90°

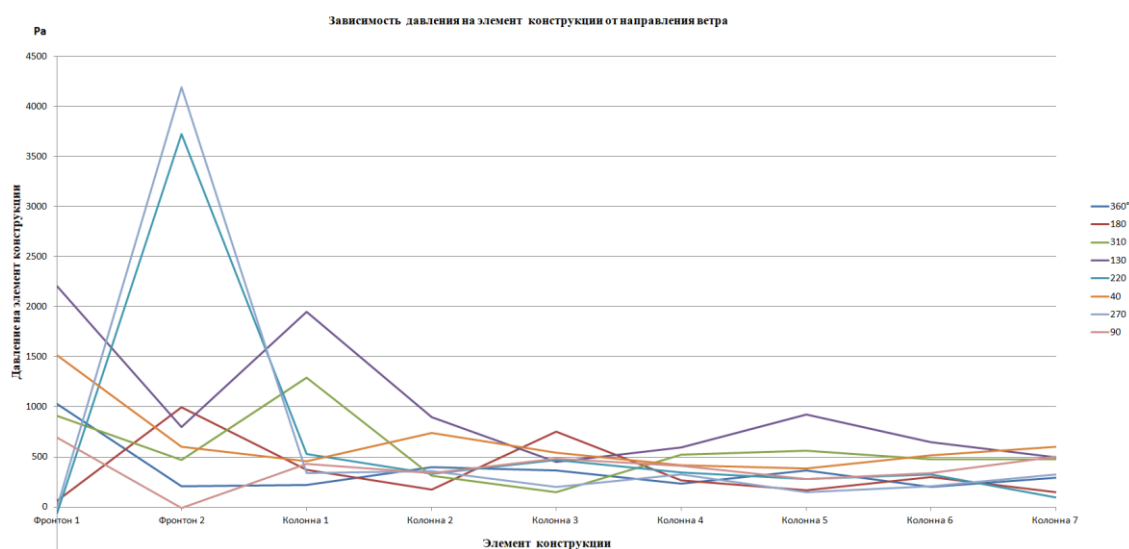
На рис. 8 представлены результаты средних значений ветрового давления на элементы конструкции археологического комплекса, а на рис. 9 их максимальные значения.

Режим обтекания колонн воздушным потоком, помимо формы самих колонн, существенно зависит от расположенного рядом фронтона.

Это влияние особенно заметно, если рассматривать колонны, расположенные на ближнем расстоянии от фронтона. В частности, колонны, расположенные в ближней зоне от фронтона, подвержены меньшей ветровой нагрузке.



**Рис. 8.** Экспериментальные средние значения ветрового давления на конструкции  
**Fig. 8.** Experimental average values of wind pressure on structures



**Рис. 9.** Экспериментальные максимальные значения ветрового давления  
**Fig. 9.** Experimental maximum values of wind pressure

Это взаимное влияние очень сложно рассчитать, и основным инструментом исследования становятся испытания. Уровень средних нагрузок разрежения в подветренных областях, существенно ниже среднего уровня на остальной поверхности, что целесообразно учесть.

Исследуемые колонны 1 и 2 по данным экспериментов не подвергаются чрезвычайному воздействию и сопоставимы с требованиями строительных норм для второго ветрового района, к которому относится Крымский полуостров.

**Заключение.** В работе проведены расчеты для различных направлений ветра. Показано, что для различных направлений ветра происходит изменение ветровой нагрузки на исследуемые сооружения «Базилики» по-разному.

Расчеты позволили выявить наиболее опасные углы атаки ветра для Фронтон 2 (220° и 270°). При таком направлении ветра значение нагрузки на Фронтон 2 является максимальным.

Также определено, что все нагрузки имеют эпизодический характер и возникают при максимальной штормовой скорости.

Нагрузки по данным исследования не могут оказать значительного воздействия на конструкцию комплекса.

В целом данный подход с применением методологии использования CFD - методов исследования является достаточно перспективным направлением для оценки метеорологической и климатической нагрузки на объекты культурного наследия. Дальнейшие исследования могут быть посвящены воздействию осадков, повышенной температуры и воздействию брызг волн при штормовом волнении моря.

*Исследование выполнено частично в рамках государственного задания Института природно-технических систем по теме (№ госрегистрации 121122300072-3) «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера и антропогенного воздействия», а также работа выполнена при поддержке департамента науки и образования г. Севастополя.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Егоркин А.А. Подходы к моделированию ветрового воздействия на потенциально-опасные объекты. Сборник трудов II Всероссийской научно-практической конференции. «Устойчивость материалов к внешним воздей-

ствиям». Химки: ФГБВОУ ВО АГЗ МЧС России. 2020. С. 48–51.

2. *Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications.* Nea/CSNI/R, (2007)5. P. 154.

3. *Assessment of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems.* Nea/CSNI/R, (2007)13. P. 180.

4. *Extension of CFD Codes Application to Two-Phase Flow Safety Problem (Phase 2).* Nea/CSNI/R. (2007)13.

5. *Menter F.* CFD Best Practice Guidelines for CFD Code Validation for Reactor-Safety Applications. European Commission, 5th EURATOM Framework Programme, Report. EVOLECORAD-1. 2002.

6. *Casey M., Wintergerste T.* Special Interest Group on Quality and Trust in Industrial CFD. Best Practice Guidelines. Ver. 1. ERCOFTAC Report. 2000.

7. *Casey M., Wintergerste T.* The best practice guidelines for CFD. A European initiative on quality and trust. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP. V. 448. No. 1. 2002. P. 1–10.

8. *AIAA Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations.* AIAA Report. G – 077 – 1988.

9. *Roache P.J.* Verification and Validation in Computational Science and Engineering. Hermosa Publishers. 1998.

10. *Oberkampf W.L., Trucano T.G.* Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics. Progress in Aerospace Sciences. V. 38. 2002. P. 209–272.

11. *Oberkampf W.L., Trucano T.G., Hirsch C.* Verification, Validation and Predictive Capability in Computational Engineering and Physics. Applied Mechanics Reviews. V. 57. 2004. P. 345–384.

12. *Computational fluid dynamics best practice guidelines for dry cask applications.* Final report. NUREG–2152. U.S. NRC. 2013. P. 117.

13. *Сборник тезисов научно-технического семинара «Проблема верификации и применения CFD кодов в атомной энергетике».* Нижний Новгород, ОАО «ОКБМ Африкантова». 2012. С. 62.

14. *Barlow J.F., Rooney G.G., von Hünnerbein S., Bradley S.G.* Relating urban surface-layer structure to upwind terrain for

the Salford experiment (Salfex). *Boundary-Layer Meteorology*. V. 127. 2008. P. 173–191.

15. *Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J., Hensen Jan L.M.* Application of CFD in building performance simulation for the outdoor environment: An overview. *Journal of Build Performance Simulation*. V. 4(2). 2011. P. 157–84.

16. *Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M., and Shirasawa T.* AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of*

*Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. October–November 2008. V. 96. P. 1749–1761.

17. *Ferreira A.D., Sousa A.C.M., Viegas D.X.* Prediction of building interference effects on pedestrian level comfort. Original Research Article *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. V. 90 (4-5). 2002. P. 305–319.

18. *Zhang AX., Gao CL., Zhang L.* Numerical simulation of the windfield around different building arrangements. Original Research Article *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. V. 93 (12). 2005. P. 891–904.

## METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF METEOROLOGICAL AND CLIMATIC LOAD ON THE OBJECTS OF CULTURAL HERITAGE

A.A. Egorkin<sup>1,2</sup>, V.P. Evstigneev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

<sup>2</sup>Sevastopol State University, RF, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

The geographical features of the Crimean Peninsula determine the manifestation of a number of dangerous meteorological and climatic factors that can have a negative impact on cultural heritage sites. Among such phenomena, strong winds with a squall stand out especially. The work is focused on the assessment of such a wind impact on the Basilica of 1935, located on the territory of the Museum-Reserve "Chersonese Taurica" as an example of a Crimean cultural heritage site. The methods of computational fluid dynamics are used as the basis for the development of approaches. The period with the most unfavorable meteorological and climatic conditions is chosen for modeling. This is done in order to assess the maximum load on the object of study.

**Keywords:** atmosphere, meteorology, climatology, dangerous phenomena.

## REFERENCES

1. *Egorkin A.A.* Podhody k modelirovaniyu vetrovogo vozdejstviya na potencial'no opasnye ob`ekty. *Sbornik trudov II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Ustojchivost' materialov k vneshnim vozdejstviyam»* (Approaches to modeling wind effects on potentially dangerous objects. Collection of proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference “Resistance of materials to external influences”). Himki: FGBVOU VO AGZ MCHS Rossii, 2020, pp. 48–51.

2. *Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications*. Nea/CSNI/R, (2007)5, 154 p.

3. *Assesmet of CFD Codes for Nuclear Reactor Safety Problems*. Nea/CSNI/R, (2007)13, 180 p.

4. *Extension of CFD Codes Application to Two-Phase Flow Safety Problem (Phase 2)*. Nea/CSNI/R, (2007)13.

5. *Menter F.* CFD Best Practice Guidelines for CFD Code Validation for Reactor-Safety Applications. European Commission, 5th EURATOM Framework Programme, Report. EVOLECORA-D1, 2002.

6. *Casey M., Wintergerste T.* Special Interest Group on Quality and Trust in Industrial CFD. Best Practice Guidelines, Ver. 1, ERCOFTAC Report, 2000.

7. *Casey M., Wintergerste T.* The best practice guidelines for CFD. A European initiative on quality and trust. *American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP*, 2002, Vol. 448, No. 1, pp. 1–10.

8. *AIAA Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations*. AIAA Report, G – 077 – 1988 (2022).



9. *Roache P.J.* Verification and Validation in Computational Science and Engineering. Hermosa Publishers, 1998.
10. *Oberkampf W.L. and Trucano T.G.* Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 38, 2002, pp. 209–272.
11. *Oberkampf W.L., Trucano T.G., and Hirsch C.* Verification, Validation and Predictive Capability in Computational Engineering and Physics. *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 57, 2004, pp. 345–384.
12. *Computational fluid dynamics best practice guidelines for dry cask applications.* Final report. NUREG – 2152. U.S. NRC, 2013, 117 p.
13. *Sbornik tezisev nauchno-tehnicheskogo seminara «Problema verifikacii i primeneniya CFD kodov v atomnoj energetike»* (Book of abstracts of the scientific and technical seminar “The problem of verification and application of CFD codes in nuclear energy”). Nizhnij Novgorod, OAO «OKBM Afrikantova», 2012, 62 p.
14. *Barlow J.F., Rooney G.G., von Hünerbein S., and Bradley S.G.* Relating urban surface-layer structure to upwind terrain for the Salford experiment (Salfex). *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 127, 2008, pp. 173–191.
15. *Blocken B., Stathopoulos T., Carmeliet J., and Hensen Jan L.M.* Application of CFD in building performance simulation for the outdoor environment: an overview. *Journal of Build Performance Simulation*, Vol. 4(2), 2011, pp. 157–84.
16. *Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M., and Shirasawa T.* AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, October–November 2008, Vol. 96, pp. 1749–1761.
17. *Ferreira A.D., Sousa A.C.M., and Viegas D.X.* Prediction of building interference effects on pedestrian level comfort. *Original Research Article Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 90 (4-5), 2002, pp. 305–319.
18. *Zhang AX., Gao CL., and Zhang L.* Numerical simulation of the windfield around different building arrangements. *Original Research Article Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93 (12), 2005, pp. 891–904.