



ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
METAL CONSTRUCTIONS**

2020, ТОМ 26, НОМЕР 4, 189–197
УДК 624.042.41:624.95

(20)-0418-1

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСАХ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕТРОВОГО ДАВЛЕНИЯ

В. Ф. Мушчанов¹, А. В. Зубенко², М. Н. Цепляев³

*ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
2, ул. Державина, г. Макеевка, ДНР, 86123.*

E-mail: ¹volodymyr.mushchanov@mail.ru, ²a.v.zubenko@donnasa.ru, ³m.n.cepliaev@donnasa.ru

Получена 06 ноября 2020; принята 27 ноября 2020.

Аннотация. В публикации рассматриваются особенности реализации в современных программных комплексах численных методов по исследованию ветрового давления и воздействия ветровой нагрузки на примере сооружений, имеющих круговую цилиндрическую поверхность, а именно вертикальных цилиндрических резервуаров больших объемов. Описывается порядок построения расчетной схемы сооружения, необходимые начальные и граничные условия. Даны рекомендации по назначению размеров расчетной области изолированного сооружения и в составе группы. Отмечено влияние размеров и формы элементов разбиения сетки на процесс вычисления. Приведены требования Eurocode и норм Российской Федерации по определению профиля скорости ветрового потока. Рассмотрен алгоритм задания расчетной схемы и настройки параметров программного комплекса SolidWorks Flow Simulation для осуществления аэродинамического расчета. Представлены графики распределения аэродинамических коэффициентов для вертикальных цилиндрических резервуаров по высоте.

Ключевые слова: резервуар, трехмерная расчетная область, цилиндрическая оболочка, ветер, аэродинамические коэффициенты.

ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ В СУЧАСНИХ ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСАХ ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІТРОВОГО ТИСКУ

В. П. Мушчанов¹, Г. В. Зубенко², М. М. Цепляєв³

*ДОНУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»,
2, вул. Державіна, м. Макіївка, ДНР, 86123.*

E-mail: ¹volodymyr.mushchanov@mail.ru, ²a.v.zubenko@donnasa.ru, ³m.n.cepliaev@donnasa.ru

Отримана 06 листопада 2020; прийнята 27 листопада 2020.

Анотація. У публікації розглядаються особливості реалізації в сучасних програмних комплексах чисельних методів для дослідження вітрового тиску і впливу вітрового навантаження на прикладі споруд, що мають кругову циліндричну поверхню, а саме вертикальних циліндричних резервуарів великих об'ємів. Описується порядок побудови розрахункової схеми споруди, необхідні початкові і граничні умови. Дано рекомендації щодо призначення розмірів розрахункової області ізольованої споруди і в складі групи. Відзначено вплив розмірів і форми елементів розбиття сітки на процес обчислення. Наведено вимоги Eurocode і норм Російської Федерації по визначенню профілю швидкості вітрового потоку. Розглянуто алгоритм завдання розрахункової схеми і налаштування параметрів програмного комплексу SolidWorks Flow Simulation для здійснення аеродинамічного розрахунку. Представлені графіки розподілу аеродинамічних коефіцієнтів для вертикальних циліндричних резервуарів по висоті.

Ключові слова: резервуар, тривимірна розрахункова область, циліндрична оболонка, вітер, аеродинамічні коефіцієнти.

FEATURES OF IMPLEMENTATION OF NUMERICAL METHODS OF WIND PRESSURE RESEARCH IN MODERN SOFTWARE PACKAGES

Volodymyr Mushchanov¹, Anna Zubenko², Maxim Tcepliaev³

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina Str., Makeyevka, DPR, 86123.*

E-mail: ¹ volodymyr.mushchanov@mail.ru, ² a.v.zubenko@donnasa.ru, ³ m.n.cepliaev@donnasa.ru

Received 06 November 2020; accepted 27 November 2020.

Abstract. The publication discusses the features of the implementation in modern software packages of numerical methods for the study of wind pressure and the impact of wind load on the example of structures with a circular cylindrical surface, namely vertical cylindrical tanks of large volumes. The procedure for constructing the design scheme of the structure, the necessary initial and boundary conditions are described. It has been given the recommendations for assigning the dimensions of the computational domain of an isolated structure and as part of a group. The influence of the size and shape of mesh elements on the computation process is noted. The requirements of Eurocode and the norms of the Russian Federation for determining the profile of the wind flow velocity are given. An algorithm for specifying the design scheme and setting the parameters of the SolidWorks Flow Simulation software package for carrying out aerodynamic calculations is considered. The graphs of the distribution of aerodynamic coefficients for vertical cylindrical tanks along the height of the tank are presented.

Keywords: reservoir, three-dimensional computational domain, cylindrical shell, wind, aerodynamic coefficients.

Актуальность проводимых исследований

Из опыта исследований в аэродинамических трубах полагают, что сооружение высотой H влияет на расстояние почти до $10H$. Размер расчетной области по вертикали для изолированных сооружений рекомендуется [1, 2, 3] принимать минимум. При исследовании группы объектов рекомендуется использовать коэффициент загромождения, который равен отношению площади поперечного сечения сооружения к площади поперечного сечения расчетной области, коэффициент не должен превышать 3%. Ширину расчетной области также необходимо назначать, чтобы коэффициент загромождения был менее 3...5% [1, 4, 5] (формула 1). Расстояние вдоль потока до сооружения должно составлять минимум $5H$. И расстояние за сооружением должно составлять $\geq 15H$. На рисунке 1 показаны схемы домена.

$$k_{BR} = \frac{A_c}{A_d} < 3 - 5\%. \quad (1)$$

При построении расчетной области для качества сетки очень важен размер сетки, а также форма сетки и форма ячеек сетки. Возможно использование разных типов сеток. Двумерные типы ячеек являются треугольными или четырехугольными, тогда как трехмерные типы ячеек могут быть шестигранниками, призматическими ячейками, пирамидами и тетраэдрами. В программном комплексе SolidWorks Flow Simulation сетка задается призматическими ячейками.

Необходимо избегать чрезмерного искажения ячеек, так как в этом случае увеличится ошибка дискретизации, а также могут возникнуть проблемы со стабильностью и невозможно будет получить сходящееся решение. Другим важным аспектом является то, что коэффициент растяжения соседних ячеек должен быть ограничен соотношением 1.3, при моделях турбулентности RANS, а иногда ниже 1.2 в областях с большими градиентами потока. Но для LES, поскольку размер сетки иногда используется в качестве фильтра, он должен быть еще меньше, а

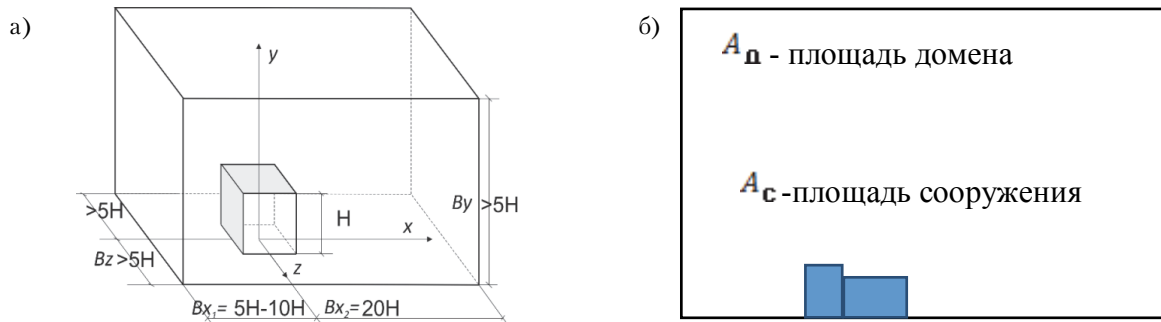


Рисунок 1. Расчетная область при компьютерном моделировании ветрового воздействия: а) трехмерная расчетная область (домен); б) сечение домена вдоль оси действия воздушного потока.

именно менее 1.1 или даже ниже 1.05. Чтобы получить хорошее растяжение сетки особенно вблизи первого слоя стен, важно, чтобы эти линии сетки или поверхности сетки ячеек были либо параллельны, либо перпендикулярны стенке. Это важно не только для того, чтобы избежать ошибки дискретизации, но и для применения пристеночных функций.

Профиль средней скорости на входе, как правило, получают в соответствии с требованиями нормативных документов. Для нашего исследования были приняты профиль средней скорости $v_m(z)$, интенсивность турбулентности $I_v(z)$, интегральный масштаб турбулентности $L_u(z)$ по формулам методик норм Eurocode и РФ (формулы 2, 4). Т. к. энергия пульсаций скорости в методике норм РФ описывается спектром Давенпорта, который не учитывает зависимость энергии турбулентных пульсаций ветра от высоты, интегральный продольный масштаб турбулентности принимает постоянное значение $L_u(z)=1\ 200$ м, интенсивность турбулентности в явном виде не фигурирует, ее можно получить согласно рекомендациям «Руководства к расчёту зданий и сооружений на действие ветра» [6, с. 74]. Нормативное значение скорости для исследуемого сооружения было принято из условия строительства объекта в первом ветровом районе и составило 30 м/с. Расчетное значение скорости по методике Eurocode [7] определяется по формуле (2).

$$v_m(z) = [1 + 7I_v(z)]^{0.5} k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) v_{b0}. \quad (2)$$

Интегральный продольный масштаб турбулентности определяется по формуле (3).

$$L(z) = L_t \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha, \quad (3)$$

где $L(z)$ – базовый масштаб;
 z_t – базовая высота;
 α – зависит от типа местности [7].

Расчетное значение скорости по методике норм Российской Федерации [8] определялось по формуле (4):

$$v = v_0 k(z_e) [1 + \zeta(z_e)]^{0.5}, \quad (4)$$

где $k(z_e) = k_{10} (z_e / 10)^2$ – изменение ветрового давления для высоты (z_e); $k_{10} = 1$; $\alpha = 0,15$ для типа местности А;
 $\zeta(z_e) = \zeta_{10} (z / \alpha)^{-\alpha}$ – коэффициент пульсаций для типа местности А.

Интенсивность турбулентности

$$I(z_e) = 2,45 k_0^{0.5} \zeta_{10} (z / \alpha)^{-\alpha}, \quad (5)$$

где $k_0 = 0,005$ – коэффициент шероховатости, подстилающей поверхности для открытой местности.

По характеру следа распределения скоростей на рисунке 2 видно, что чем выше соотношение f/D , тем выше характер турбулентности позади рассматриваемого вертикального цилиндрического резервуара.

Задание целей проекта

На этапе задания целей необходимо указать аэродинамические параметры (рис. 3), определение которых является целью моделирования. В нашем случае при исследовании по определению аэродинамических коэффициентов для модели вертикального цилиндрического резервуара

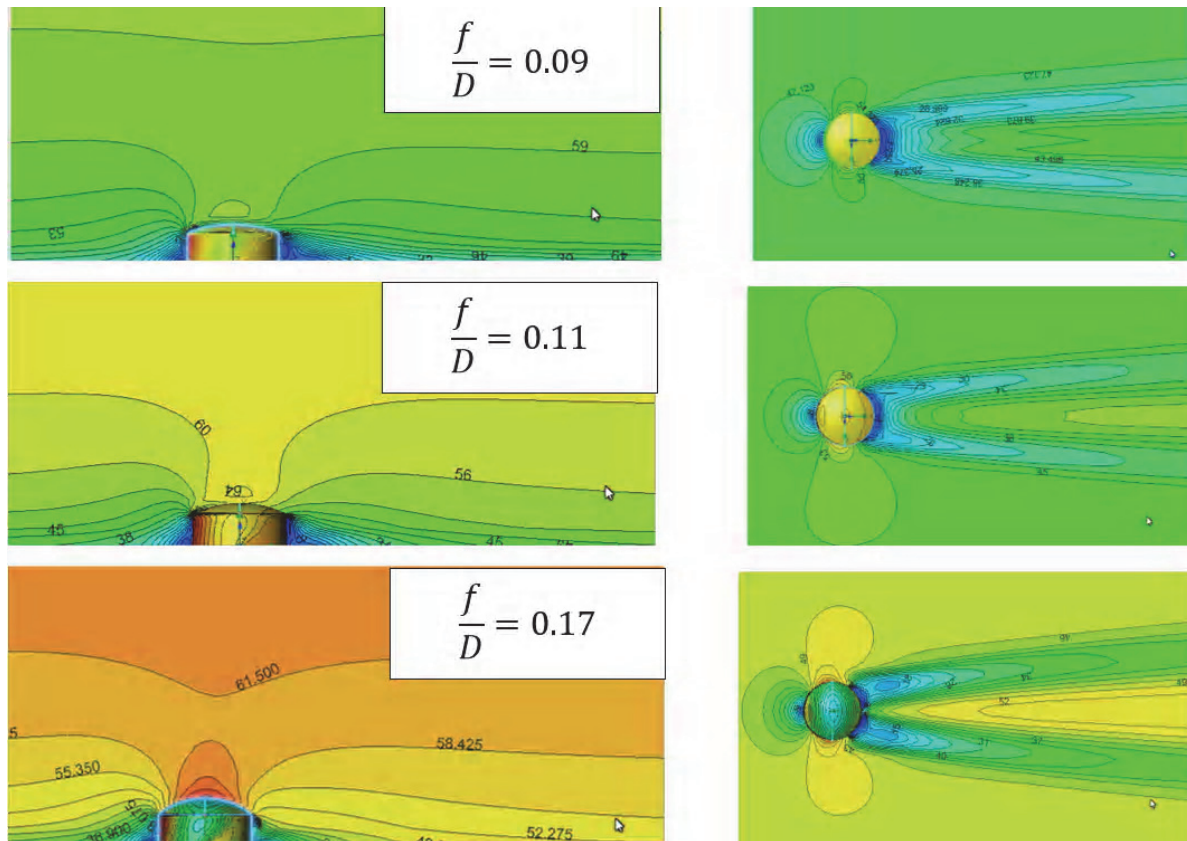


Рисунок 2. График распределения аэродинамических коэффициентов по высоте для ВЦР со сферическим покрытием объемом 10 тыс. м³.

задавались глобальные цели, которые являются критериями сходимости решения аэродинамической задачи, и определяют завершение расчёта проекта: по средней скорости (GG Av Velocity), среднему полному (GG AV Total Pressure), динамическому давлению (GG Av Dynamic Pressure), среднему значению плотности, нормальному значению силы, и цели-выражения для определения коэффициента подъемной силы. Указание целей, как правило, согласуется с заданными граничными условиями. На рисунке 4 показано окно для ввода скорости, интенсивности турбулентности и масштаба турбулентности.

Если цели проекта не заданы, то программа задействует свои внутренние критерии сходимости для окончания расчёта, соответственно результаты, полученные таким образом, могут иметь большую погрешность по интересующим параметрам, чем при задании целей вручную. Кроме того, общее время вычислений будет тем больше, чем менее мощный используемый компьютер и сложнее решаемая задача.

Запуск и проведение расчёта

После задания всех необходимых условий можно осуществить настройку и запуск созданного проекта на расчёт, который осуществляется следующим образом: – Панель быстрого доступа – Flow Simulation – Solve – Run.

В открывшемся окне запуска проекта устанавливаются следующие группы настроек: Startup – настройки, отвечающие за генерацию новой или использование ранее созданной расчётной сетки, начало нового или продолжение расчёта прошлого проекта.

В соответствии с варьируемыми параметрами задавались размеры расчетной области для каждой расчетной схемы изолированного резервуара и группы. На рисунке 5 показан пример задания расчётной области для конструкции одиночного резервуара, рассчитываемого в соответствии с рекомендациями [3, 5, 9, 10].

CPU and memory usage – настройки, отвечающие за полноту использования для расчёта доступных на данной машине или группе машин

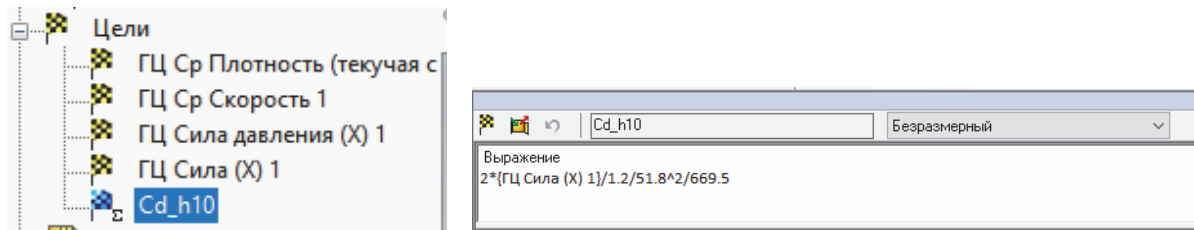


Рисунок 3. Цели при компьютерном моделировании ветрового воздействия.

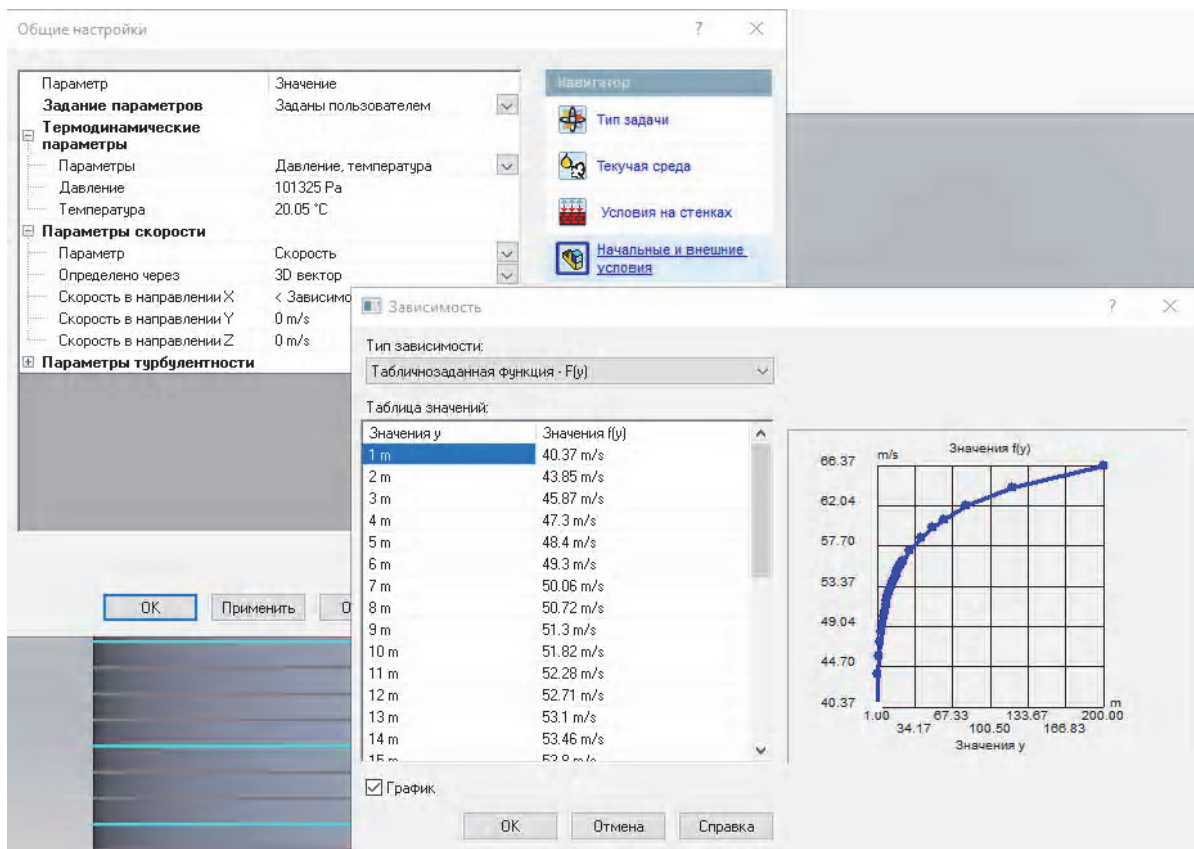


Рисунок 4. Исходные данные при компьютерном моделировании ветрового воздействия (скорость, интенсивность турбулентности, масштаб турбулентности).

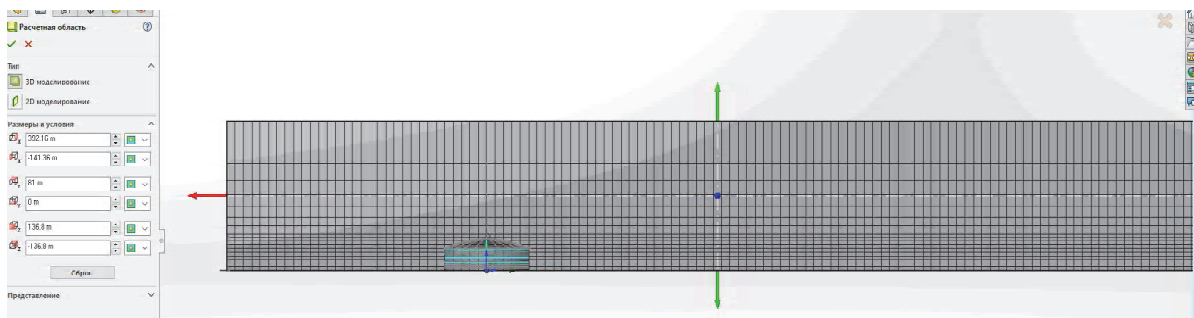


Рисунок 5. Определение размера расчетной области.

процессорных ресурсов. Result processing after finishing the calculation – настройка отображения полученных после расчёта результатов в виде графиков, таблиц.

Во время расчёта проекта, который производится путём последовательных итераций, можно выводить на экран текущие результаты, инициировать адаптацию сетки к решению задачи, останавливать или прекращать расчёт. При получении положительных результатов по внутренним или заданным критериям сходимости программа выдаст сообщение: Solver is finished.

Просмотр и анализ результатов

После окончания расчетов выполняется анализ результатов по распределению параметров ветрового потока при помощи различного инструментария для просмотра и анализа, доступных в Flow Simulation. Для всех инструментов вначале указывается необходимый параметр для просмотра, а затем способы и область его визуализации (рис. 6). При помощи инструмента XY plot

создаются графики для рассматриваемого параметра.

Соответственно можно сделать выводы о рациональности использования такого программного комплекса, как SolidWorks Flow Simulation, для решения задач строительной аэродинамики, что позволит существенно уменьшить затраты по времени на этапах по изучению, проектированию, внедрению и эксплуатации новых и уже существующих зданий и сооружений.

На рисунке 7 показана блок-схема численного исследования.

Выводы

1. Рациональность использования такого программного комплекса, как SolidWorks Flow Simulation, для решения задач строительной аэродинамики позволит существенно уменьшить затраты по времени на этапах по изучению, проектированию, внедрению и эксплуатации новых и уже существующих зданий и сооружений.

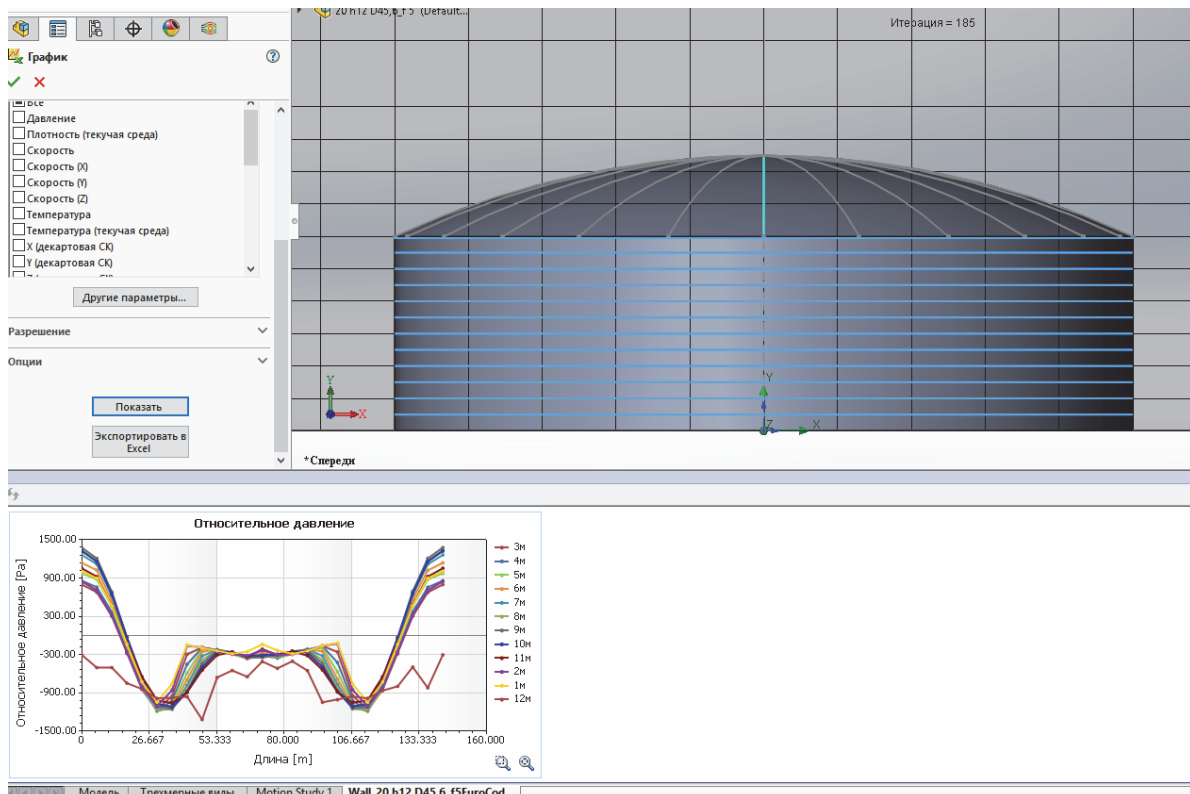


Рисунок 6. Просмотр и анализ результатов расчетов.

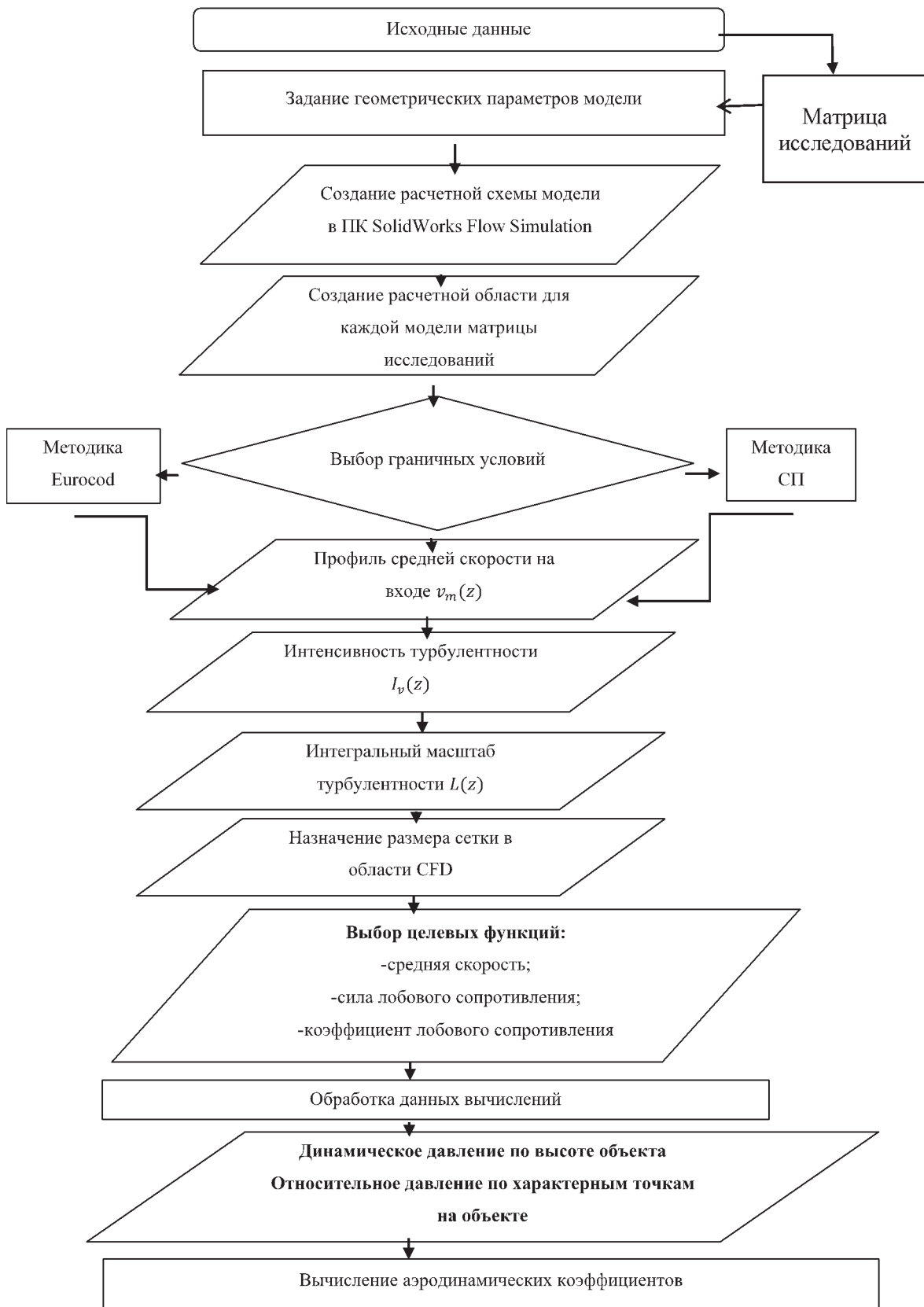


Рисунок 7. Блок-схема методики численного моделирования.

- Предложен методический подход, обеспечивающий корректное отображение физических процессов обтекания ветровым потоком конструкции резервуара (сравнение результатов

экспериментальных данных и численного исследования обеспечивает сходимость в пределах 6...10 % для основных расчетных сечений).

Литература

- Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment [Текст] / Edited by Jörg Franke, Antti Hellsten, Heinke Schlünzen, Bertrand Carissimo. – Hamburg : Meteorological Inst., 2007. – 52 p. – ISBN 3-00-018312-4.
- Model Evaluation Guidance and Protocol Document [Текст] / Edited by Rex Britter and Michael Schatzmann. – Hamburg : Meteorological Inst., 2007. – 28 p. – ISBN 3-00-018312-4.
- AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings [Текст] / Yoshihide Tominaga, Akashi Mochida, Ryuichiro Yoshie [et al.] // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008. Volume 96, Issues 10-11. P. 1749–1761.
- Tamura, T. AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings [Текст] / T. Tamura, K. Nozawa, K. Kondo // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008. Volume 96, Issues 10-11. P. 1974–1984.
- Development of CFD method for predicting wind environment around a high-rise building part 2: the cross comparison of CFD results using various k-models for the flowfield around a building model with 4:4:1 shape [Текст] / T. Shirasawa, T. Tominaga, R. Yoshie [et al.] // *AIJ Journal of Technology and Design*. 2003. Vol. 18. P. 169–174.
- Руководство по расчету зданий и сооружений на действие ветра [Текст] / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. – Москва : Стройиздат, 1978. – 216 с.
- ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010. Єврокод 1. Дії на конструкції [Текст]. Частина 1-4. Загальні дії. Вітрові навантаження (EN 1991-1-4:2005, IDT). – Введений вперше ; надано чинні 2013-07-01.07. – К. : Мінрегіон України, 2013. – 165 с.
- СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия [Текст] : актуализированная редакция «СНиП 2.01.07-85*» ; введен 2017-06-04. – М. : Минстрой России, 2016. – 110 с.
- Cross comparisons of CFD results of wind environment at pedestrian level around a high-rise building and within a building complex [Текст] / Y. Tominaga, A. Mochida, T. Shirasawa [et al.] // *Journal of Asian architecture and building engineering*. 2004. Vol. 3(1). P. 63–70.
- Refined methods for calculating and designing engineering structures [Текст] / V. P. Mushchanov, A. N. Orzhekhovskii, A. V. Zubenko [et al.] // *Инженерно-строительный журнал : специализированный научный журнал*. 2018. № 2(78). С. 101–115.

References

- Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment [Text]. Edited by Jörg Franke, Antti Hellsten, Heinke Schlünzen, Bertrand Carissimo. Hamburg : Meteorological Inst., 2007. 52 p. ISBN 3-00-018312-4. (in English)
- Model Evaluation Guidance and Protocol Document [Text]. Edited by Rex Britter and Michael Schatzmann. Hamburg : Meteorological Inst., 2007. 28 p. ISBN 3-00-018312-4. (in English)
- Tominaga, Yoshihide; Mochida, Akashi; Yoshie, Ryuichiro [et al.]. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings [Text]. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008. Volume 96, Issues 10-11. P. 1749–1761. (in English)
- Tamura, T.; Nozawa, K.; Kondo, K. AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings [Text]. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2008. Volume 96, Issues 10-11. P. 1974–1984. (in English)
- Shirasawa, T. Tominaga, T. Yoshie, R. [et al.]. Development of CFD method for predicting wind environment around a high-rise building part 2: the cross comparison of CFD results using various k-models for the flowfield around a building model with 4:4:1 shape [Text]. In: *AIJ Journal of Technology and Design*. 2003. Vol. 18. P. 169–174. (in English)
- V. A. Kucherenko CSRIBS. Guide to the calculation of buildings and structures for the effect of wind [Text]. Moscow : Stroizdat, 1978. 216 p. (in Russian)
- DSTU-N B EN 1991-1-4:2010. Eurocode 1. Actions on structures [Text]. Part 1-4. General actions. Wind loads. Kyiv : Ministry of Regional Development of Ukraine, 2013. 165 p. (in Ukraine)
- SP 20.13330.2016. Loads and Impacts [Text]. M. : Ministry of Construction of Russia, 2016. 110 p. (in Russian)
- Tominaga, Y.; Mochida, A.; Shirasawa, T. [et al.]. Cross comparisons of CFD results of wind environment at pedestrian level around a high-rise building and within a building complex [Text]. In: *Journal of Asian architecture and building engineering*. 2004. Vol. 3(1). P. 63–70. (in English)
- Mushchanov, V. P.; Orzhekhovskii, A. N.; Zubenko, A. V. [et al.]. Refined methods for calculating and designing engineering structures [Text]. In: *Civil Engineering Journal: a specialized scientific journal*. 2018. № 2(78). P. 101–115. (in English)

Мушчанов Владимир Филиппович – доктор технических наук; профессор, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, проректор по научной работе ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Член международной организации «Институт гражданских инженеров» и международной организации «Пространственные конструкции», академик Академии строительства Украины и Украинской академии наук, член-корреспондент Академии архитектуры Украины. Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

Зубенко Анна Васильевна – ассистент кафедры теоретической и прикладной механики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: исследование воздействия ветровой нагрузки на сооружения, имеющие круговую цилиндрическую поверхность, численные методы расчета тонких оболочек положительной гауссовой кривизны.

Цепляев Максим Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной механики ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: расчёт и проектирование вертикальных цилиндрических резервуаров, повышение эффективности методик расчёта оболочек на устойчивость.

Мушчанов Володимир Пилипович – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри теоретичної та прикладної механіки, проректор з наукової роботи ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Член міжнародної організації «Інститут цивільних інженерів» та міжнародної асоціації «Просторові конструкції», академік Академії будівництва України і Української академії наук, член-кореспондент Академії архітектури України. Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

Зубенко Ганна Василівна – асистент кафедри теоретичної та прикладної механіки ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: дослідження впливу вітрового навантаження на споруди, що мають кругову циліндричну поверхню, чисельні методи розрахунку тонких оболонок позитивної гауссової кривизни.

Цепляєв Максим Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної та прикладної механіки ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: розрахунок і проектування вертикальних циліндричних резервуарів, підвищення ефективності методик розрахунку оболонок на стійкість.

Mushchanov Volodymyr – D. Sc. (Eng.), Professor; Head of the Theoretical and Applied Mechanics Department, vice-rector on the scientific activity of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. A member of the international organization «Institute of Civil Engineer» and international organization of «Spatial Structures». Scientific interests: the reliability theory, analyses, designing and engineering diagnostics of spatial metal structures.

Zubenko Anna – Assistant, Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: study of the impact of wind loads on structures with a circular cylindrical surface, numerical methods for calculating thin shells of positive Gaussian curvature.

Tsepliaev Maxim – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Theoretical and Applied Mechanics Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: calculation and design of vertical cylindrical tanks, increasing the efficiency of shell calculation methods for stability.