

**Строительная механика**

Научная статья

УДК 69.04

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/133-142>

О.С. Горячевский, О.С. Сарычева

ГОРЯЧЕВСКИЙ ОЛЕГ СЕРГЕЕВИЧ – заместитель директора Научно-образовательного центра компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов им. А.Б. Золотова, [osgoryachevskij@mail.ru](mailto:osgoryachevskij@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8219-4598>

САРЫЧЕВА ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА – студент, [olga.sarycheva.2001@mail.ru](mailto:olga.sarycheva.2001@mail.ru)

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*  
Москва, Россия

## **Верификация модели погруженного тела и технологии пересекающихся сеток для задач строительной аэродинамики**

**Аннотация.** В работе представлены анализ и верификация подходов к численному моделированию аэродинамики тонких или малых конструкций в составе зданий или сооружений. Рассматриваются метод погруженного тела, реализованный в ANSYS CFX, и технология пересекающихся сеток, реализованная в ANSYS Fluent. Выявлена низкая точность метода погруженного тела в ближней зоне. Технология пересекающихся сеток показала точные результаты почти всюду, но на границе сеток содержит численные дефекты.

*Ключевые слова:* численное моделирование аэродинамики, строительная аэродинамика, метод погруженных тел, перекрывающиеся сетки

**Для цитирования:** Горячевский О.С., Сарычева О.С. Верификация модели погруженного тела и технологии пересекающихся сеток для задач строительной аэродинамики // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 4(57). С. 133–142.

### **Введение**

Определение ветровых нагрузок для конструкций, зданий и сооружений остается сложной и недоизученной проблемой. Между тем ветровые нагрузки являются исходными данными для проектирования. Некорректное определение ветровых нагрузок может приводить к уменьшению надежности строительных конструкций или к необоснованному завышению стоимости. Наиболее распространенный на данный момент подход к определению ветровых нагрузок – физическое моделирование в аэродинамических трубах – имеет ряд недостатков (проблемы подобия, сложность учета окружающей застройки в достаточном радиусе, учет мелких деталей и др.). Бурное развитие вычислительной техники и программно-алгоритмического обеспечения привело к обширному внедрению в строительную практику методов вычислительной аэродинамики (CFD). Эти методы имеют ряд преимуществ над физическим экспериментом: фиксация результатов в сотнях тысяч точек, в том числе на мелких деталях, визуализация потока, возможность учета дополнительной «физики» (теплопроводность, перенос веществ и др.). Тем не менее ограничения вычислительных мощностей диктуют необходимость использования упрощенных подходов для учета слишком тонких или малых конструкций, например модели погруженного тела или технологии перекрывающихся сеток.

В ходе сопоставления результатов эксперимента и численного моделирования аэродинамики зданий в прямой постановке и с учетом модели погруженного тела выявлены большие

отклонения от эксперимента при использовании как модели погруженного тела, так и в прямой постановке [2]. Значительно лучшее соответствие эксперименту в работах при использовании прямой численной постановки [14], по данным исследования [2], вызывает сомнения. Эффективность данной модели проверяется при моделировании поля течения вокруг подводного крыла [9].

При изучении применимости модели погруженного тела были продемонстрированы возможности применения данного метода на примере численного моделирования на неструктурированных сетках аэродинамики движущегося цилиндра [1]. Полученные результаты показали эффективность данного метода при решении двумерных задач на адаптивной сетке.

Метод погруженного твердого тела применяется и при моделировании задач тепло- и массообмена. Сравнение показателей анализа динамического коэффициента теплопередачи с результатами эксперимента показывает незначительную разницу [13].

При моделировании ламинарного течения вокруг вибрирующего цилиндра используется технология перекрывающихся сеток [8]. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными, что свидетельствует о возможности применения данного метода для моделирования течений с движущимися конструктивными системами.

Кроме того, технология перекрывающихся сеток широко применяется в задачах судостроения [10, 12], при конструировании летательных аппаратов [6, 11] и др. В ходе сравнения результатов численного моделирования с экспериментальными и аналитическими данными было получено высокое сходство. Следовательно, технология перекрывающихся сеток эффективна для решения разных типов задач и может быть применена к объектам со сложной геометрией.

Цель настоящей работы – исследование применимости модели погруженного тела и технологии перекрывающихся сеток для задач строительной аэродинамики.

## Методы

В данной работе используются программные комплексы Ansys CFX и Ansys Fluent, позволяющие реализовать численное решение осредненных по Рейнольдсу трехмерных уравнений Навье–Стокса для несжимаемой среды с использованием замыкающих моделей турбулентности:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right); \quad (1)$$

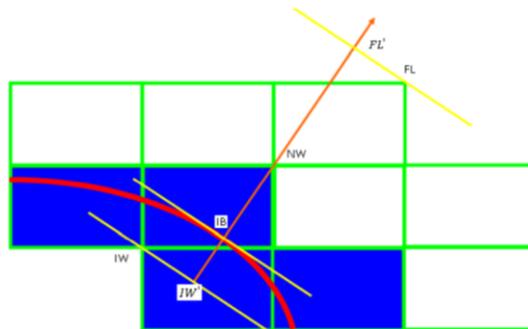
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0;$$

где  $u_i$  – компоненты вектора скорости (по осям  $x, y, z$ );  $p$  – давление;  $t$  – время;  $\rho$  – плотность;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости.

Для всех расчетов применялась зарекомендовавшая себя в промышленных приложениях модель турбулентности *SST k- $\omega$* .

## Математическая модель погруженного твердого тела

Реализованный в ANSYS CFX метод погруженных тел дает возможность решать круг задач со сложной геометрической формой объектов. Погруженное твердое тело – это твердый объект, помещенный в область жидкости или газа. Он занимает тот же объем, что и часть среды, которая содержит в себе погруженное тело. Основная особенность данного метода заключается в построении двух отдельных сеток для расчета течения жидкости и расчета параметров погруженной границы (рис. 1).



**Рис. 1. Схема границы погруженного твердого тела: зеленые ячейки – конечные объемы, красная линия – граница тела**

Данный метод реализует граничные условия путем модификации системы уравнений Навье–Стокса. Добавляется источниковый член  $S$ , который имеет физический смысл напряжения объемной силы:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u \right) + \nabla p = \nu \Delta u + S, \tag{2}$$

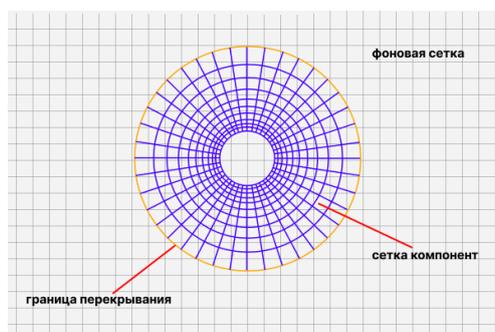
$$\begin{cases} S_x = -\alpha\beta C(U_x - U_x^F), \\ S_y = -\alpha\beta C(U_y - U_y^F), \\ S_z = -\alpha\beta C(U_z - U_z^F), \end{cases} \tag{3}$$

где  $U_x, U_y, U_z$  – компоненты скорости жидкости;  $U_x^F, U_y^F, U_z^F$  – компоненты скорости силы, обусловленной погруженным твердым телом;  $C$  – коэффициент источника импульса (является большим числом и оценивается как среднее из трех диагональных коэффициентов в уравнении импульса);  $\alpha$  – коэффициент масштабирования силы момента;  $\beta$  – специальная форсирующая функция [3].

Настройка коэффициента масштабирования представляет собой баланс между точностью и устойчивостью. Большее значение приведет к более точному решению, но менее устойчиво и может вызвать трудности сходимости. Функция  $\beta$  определяет расположение узлов вблизи стенок.  $\beta$  устанавливается равной нулю для узлов жидкости, лежащих вне области погруженного тела, и единице для узлов жидкости внутри погруженного тела.

### Технология перекрывающихся сеток

Модуль Ansys Fluent позволяет производить построение расчетных областей из перекрывающихся сеток, то есть применять химерную методологию, которая предполагает комбинирование конформно соединенных сеточных зон и неконформных интерфейсов [4]. Суть данной технологии заключается в создании двух самостоятельных сеток: фоновая и сетка компонент (рис. 2).



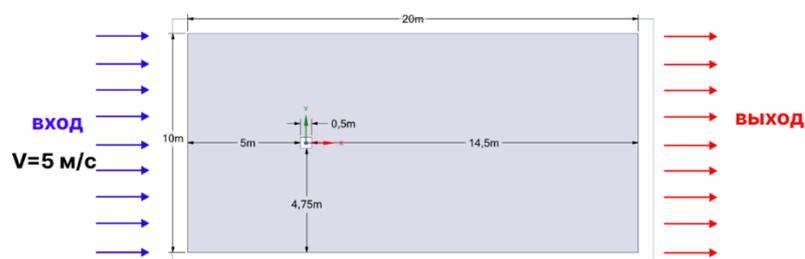
**Рис. 2. Перекрывающийся интерфейс**

Применяя технологию перекрывающихся сеток, можно использовать неструктурированную сетку в основной части и структурированную в отдельных местах, которые имеют

большее значение при решении поставленной задачи. Помимо этого, отдельные части исследуемой модели могут быть созданы независимо друг от друга и с меньшим количеством ограничений в отличие от традиционных сеток, соединяемых с помощью поверхностных интерфейсов, то есть намного проще перемещать сеточную зону, чем перестраивать всю расчетную область. Таким образом, метод перекрывающихся сеток позволяет создавать сеточные модели для задач со сложной геометрией с минимальными затратами по времени.

### Описание решаемой задачи

Для верификации метода погруженных тел и технологии перекрывающихся сеток была выбрана задача обтекания прямоугольного цилиндра  $0,5 \times 0,5$  м в двухмерной постановке (рис. 3). Задача была решена тремя способами: методом прямого численного моделирования (Direct), с использованием метода погруженных тел (Immersed Solid) и с использованием технологии перекрывающихся сеток (Overset Mesh). За эталон принимались результаты прямого численного моделирования.

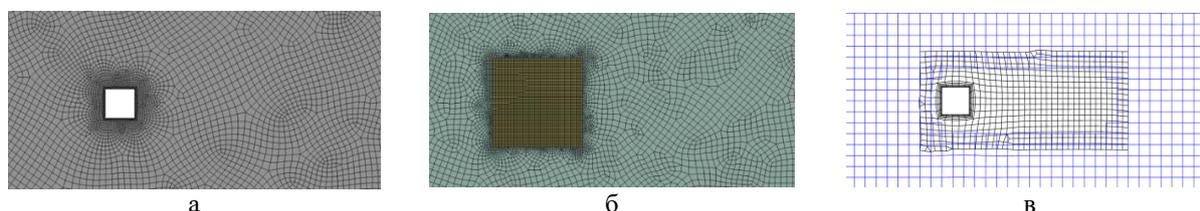


**Рис. 3. Схема расчетной области с заданными геометрическими параметрами и граничными условиями**

Для расчетного случая, выполненного прямым численным моделированием, модель прямоугольного цилиндра «вычитается» из воздушного пространства. Для случая решения задачи с применением модели погруженного тела создается дополнительный объем (в форме параллелепипеда) внутри расчетного домена, который, в свою очередь, содержит внутри себя прямоугольный цилиндр. Размеры дополнительного объема составили  $1,5 \times 1,5 \times 0,05$  м.

Для верификации технологии перекрывающихся сеток создается основной воздушный домен, который остается «пустым», а также отдельная расчетная область, из которой «вычитается» модель прямоугольного цилиндра.

Следующим этапом решения задачи является создание структурированной гексаэдральной сетки в модуле Ansys Meshing (рис. 4). В случае задачи с применением технологии перекрывающихся сеток необходимо провести минимизацию перекрытия для сокращения количества элементов, которые не участвуют в решении.



**Рис. 4. Сеточная модель вблизи исследуемого объекта:**  
**а – метод прямого численного моделирования; б – метод погруженного тела;**  
**в – технология перекрывающихся сеток (после минимизации перекрытия)**

На входе в расчетную область задавалась скорость ветрового потока, равная 5 м/с, и интенсивность турбулентности 5%, а на выходе – нулевое статическое давление (рис. 5). На нижней и верхней границах расчетного домена задавались граничные условия симметрии (нулевая производная по нормали для скоростей и давлений). Для случая решения задачи методом прямого численного моделирования и с применением технологии перекрывающихся

сеток на границах прямоугольного цилиндра задано условие  $u_i = 0$ , исключающее проникновение вещества через поверхность. Для случая решения задачи методом погруженного тела прямоугольный цилиндр моделируется в соответствии с выражениями (2), (3).

Расчеты проводились в стационарной постановке с использованием псевдонестационарных решателей Ansys CFX и Ansys Fluent, схемы связи скоростей и давления – Coupled. Критерий сходимости – снижения суммарных относительных невязок до  $10^{-5}$ .



Рис. 5. Схема расчетной области с обозначением сечений

### Результаты расчетов

В разделе приводятся результаты численного моделирования скоростей и давлений, представляющие интерес для задач строительной аэродинамики. Для каждого расчетного случая были выведены и соотнесены графики скоростей и давлений в характерных сечениях:  $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $x = 2D$  (рис. 5). Для построения графиков использовалась среда Microsoft Excel. Полученные результаты показаны на рис. 6, 7.

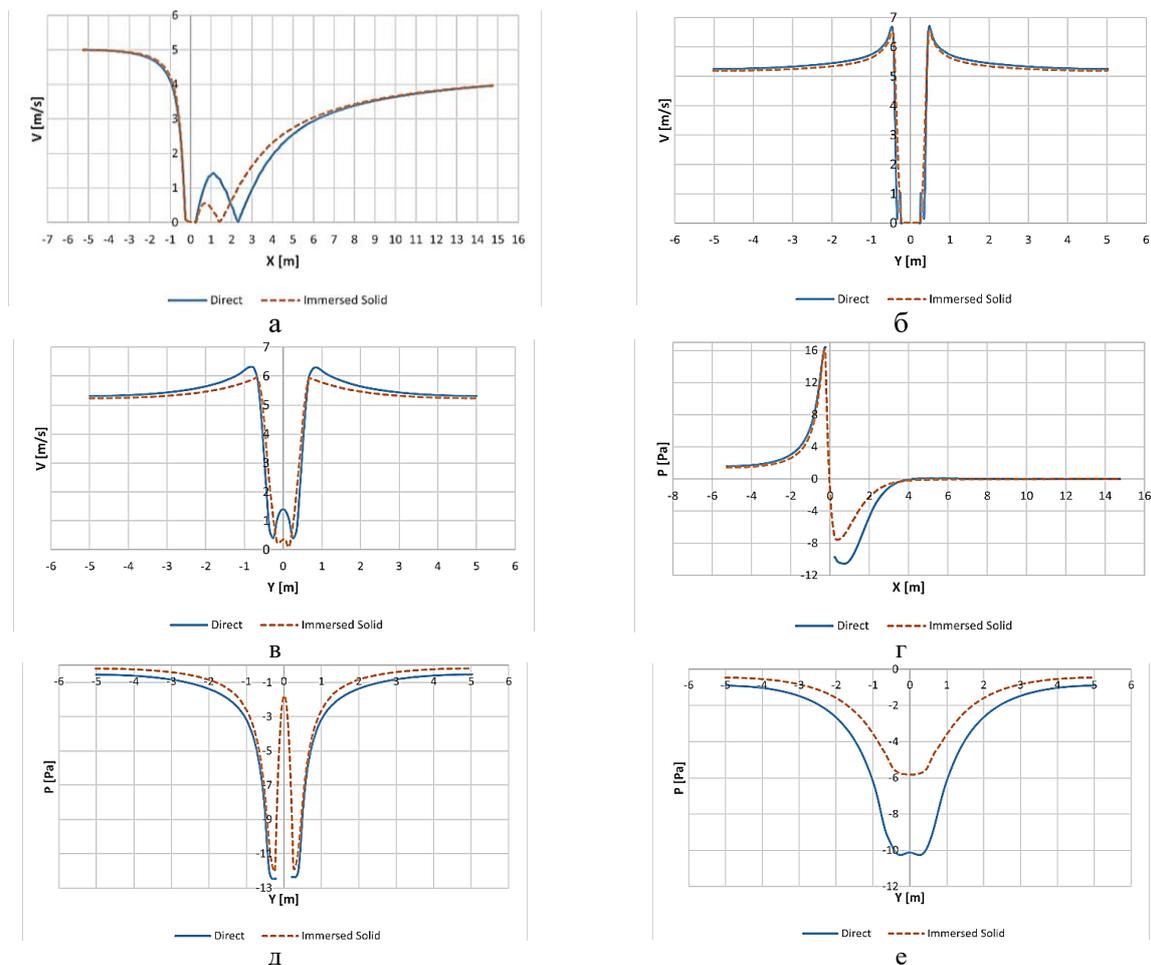
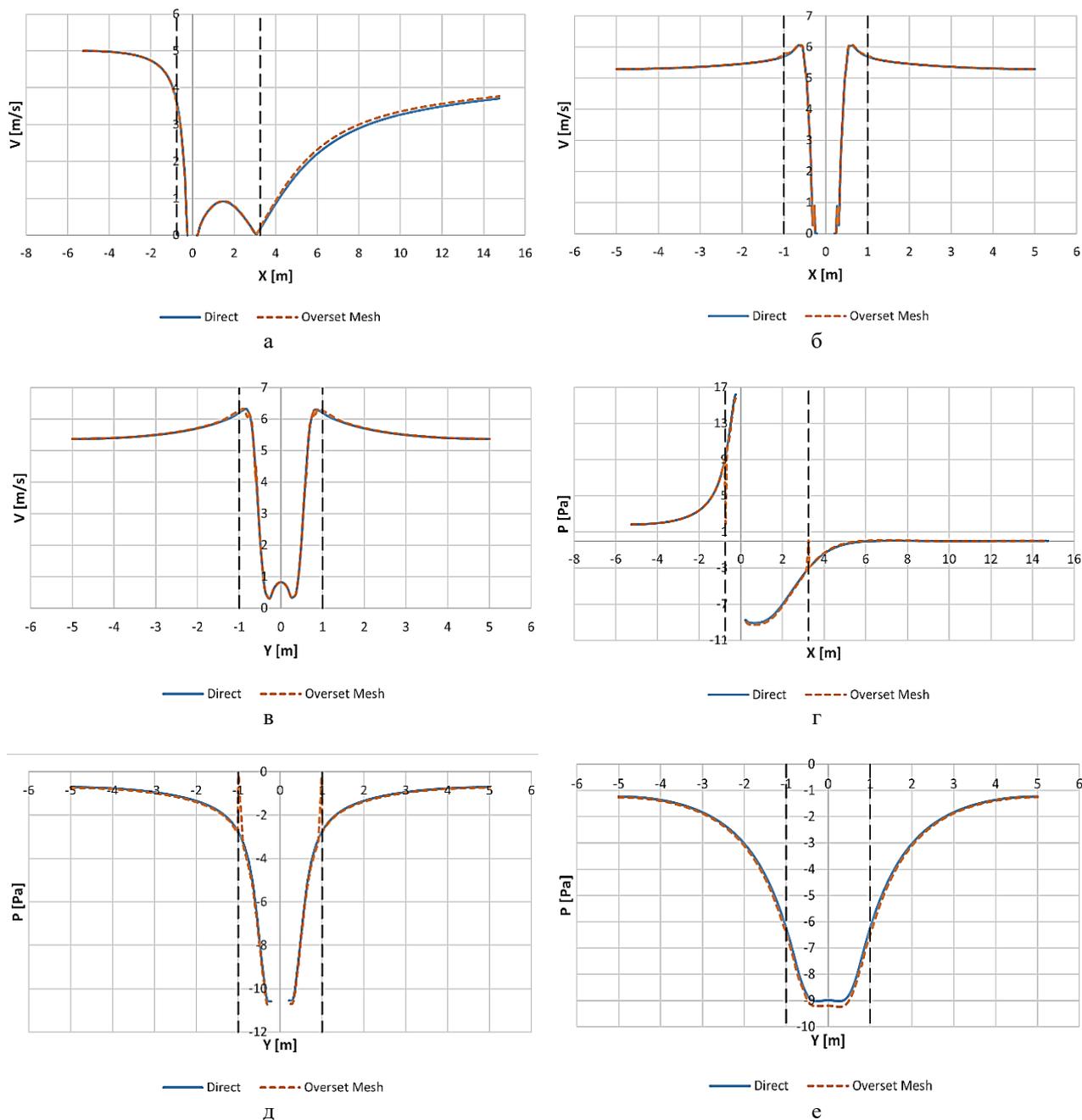


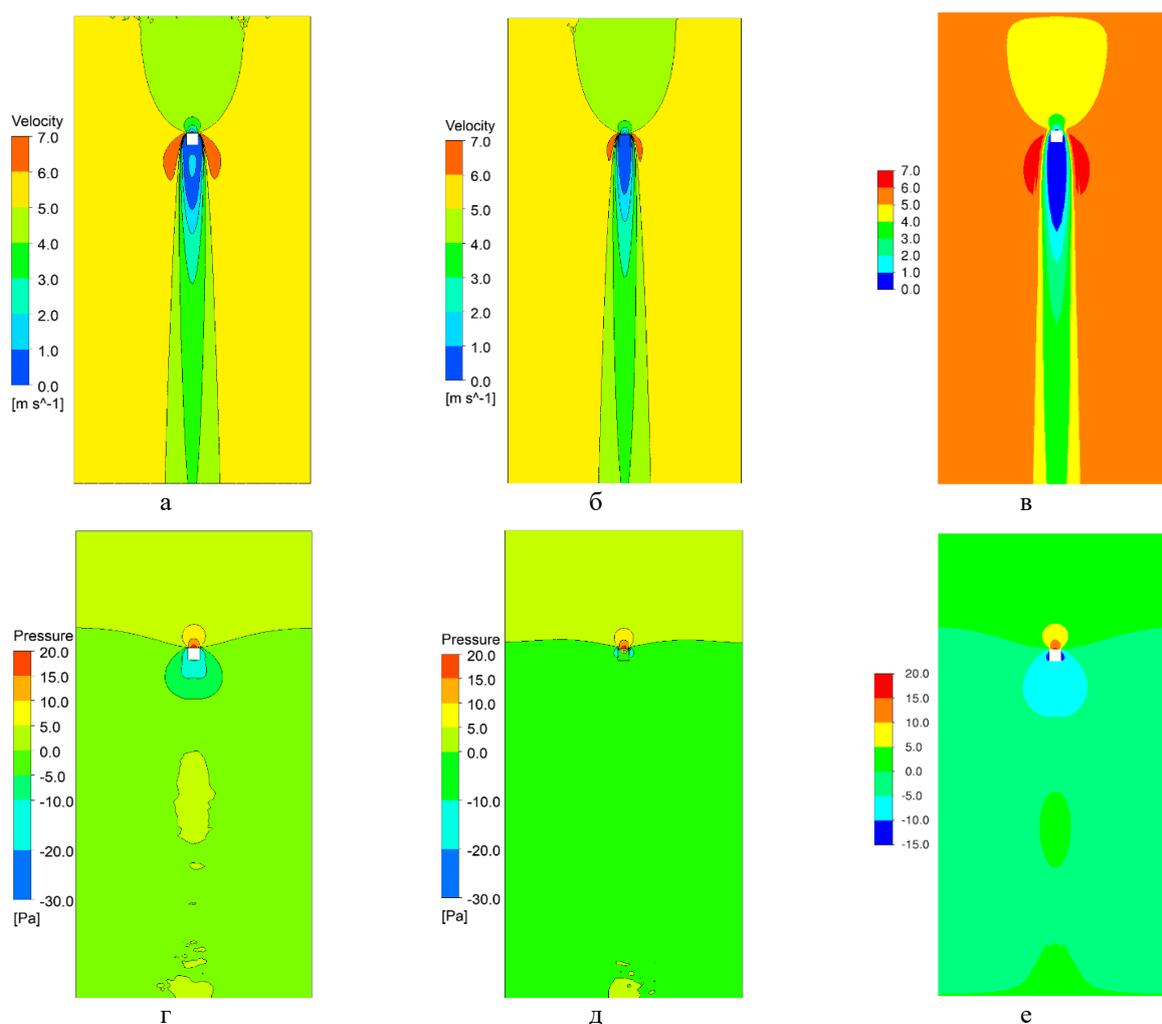
Рис. 6. Графики скоростей (м/с) и давления (Па) вдоль линий (метод погруженного тела Immersed Solid). Скорости: а –  $y = 0$ ; б –  $x = 0$ ; в –  $x = 2D$ . Давления: г –  $y = 0$ ; д –  $x = 0$ ; е –  $x = 2D$



**Рис. 7. Графики скоростей (м/с) и давления (Па) вдоль линий (технология перекрывающихся сеток Overset Mesh). Скорости: а –  $y = 0$ ; б –  $x = 0$ ; в –  $x = 2D$ . Давления: г –  $y = 0$ ; д –  $x = 0$ ; е –  $x = 2D$**

На графиках представлена легенда, на которой Direct – метод прямого численного моделирования, Immersed Solid – метод погруженного тела, Overset Mesh – технология перекрывающихся сеток. Черной вертикальной пунктирной линией на графиках показана граница сетки компонента (для технологии перекрывающихся сеток).  $D = 0,5$  м – сторона прямоугольного цилиндра.

Цветовая палитра для технологии пересекающихся сеток отличается от остальных результатов (рис. 8), так как рисунок сделан в Ansys Fluent.



**Рис. 8. Изополя скоростей (м/с) и давления (Па).  
Скорости: а – Direct; б – Immersed Solid; в – Overset Mesh.  
Давления: г – Direct; д – Immersed Solid; е – Overset Mesh**

### Обсуждение результатов

Анализ результатов, полученных в ходе решения задачи методом погруженного тела, показал значительные отклонения скоростей и давлений от эталона в широкой области вокруг цилиндра, за исключением направления вверх по потоку. Возможно, это связано с особенностями реализации метода в Ansys CFX, однако программный комплекс не предоставляет никаких опций для настройки погруженных тел. Таким образом, метод погруженного тела, реализованный в ANSYS CFX, не применим, когда нас интересуют аэродинамические характеристики в радиусе  $\leq 5$  размеров обтекаемого тела.

В результате решения задачи с применением технологии перекрывающихся сеток в Ansys Fluent зафиксированы незначительные отклонения скоростей и давлений во всей расчетной области. Скачки значений на границах сетки, наблюдаемые на рис. 7, являются численным дефектом метода и не оказывают негативного эффекта на общее решение, так как носят локальный характер.

### Заключение

Проведенное исследование показывает плохую применимость модели погруженного тела, реализованную в Ansys CFX, для исследования аэродинамики зданий, сооружений и отдельных конструкций. При использовании модели можно доверять только результатам в областях, удаленных от погруженного тела на расстояние не менее 5 характерных размеров.

Напротив, использование технологии перекрывающихся сеток, реализованной в Ansys Fluent, показало себя положительно: скорости и давления демонстрируют незначительные отклонения от результатов прямого моделирования. Однако при анализе результатов следует помнить, что на границе сеток наблюдаются численные дефекты.

Авторы рекомендуют использовать технологию пересекающихся сеток, реализованную в Ansys Fluent, вместо модели погруженного тела, реализованную в Ansys CFX, для численного исследования аэродинамики мелких элементов конструкций, для которых проблематично применить прямой подход. Вместе с тем, применение технологии пересекающихся сеток для сложных задач может оказаться затруднительным из-за ограниченности алгоритмов генерации сетки.

Отметим, что выводы авторов основаны на решении достаточно простого квазидвумерного примера. При решении задач со сложной геометрией и трехмерным течением следует каждый раз проводить подробный верификационный анализ.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Моделирование аэродинамики движущегося тела, заданного погруженными границами на динамически адаптивной неструктурированной сетке / И.В. Абалакин, П.А. Бахвалов, О.А. Доронина, Н.С. Жданова, Т.К. Козубская // Математическое моделирование. 2018. Т. 30, № 5. С. 57–75. <https://doi.org/10.1134/S2070048219010034>
2. Сравнение методов численного моделирования аэродинамики зданий / Г.В. Улюмджиева, Д.Н. Цебикова, Л.К. Хохолкина, В.А. Темяникова, Б.Б. Баиров // Инновации и инвестиции. 2019. № 10. С. 293–297. EDN: XTRJCX
3. Ansys CFX-Solver Theory Guide. ANSYS Inc., 2022. 386 с.
4. Ansys Fluent User's Guide. ANSYS Inc., 2022. 5466 с.
5. Thordal M.S., Bennetsen J.C., Koss H.H.H. Review for practical application of CFD for the determination of wind load on high-rise buildings. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2019;186:155–168. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.12.019>
6. Céspedes J.F., Lopez O.D. Simulation and validation of the aerodynamic performance of a quadcopter in hover condition using overset mesh. *AIAA Aviation 2019 Forum*. <https://doi.org/10.2514/6.2019-2824>
7. Cochran L., Derichson R. A physical modeler's view of Computational Wind Engineering. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2011;99:139–153. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2011.01.015>
8. Hamdoon F.O., Jaber A.A., Flaieh E.H. An overset mesh approach for a vibrating cylinder in uniform flow. *Curved and Layered Structures*. 2022;9(1):396-402. <https://doi.org/10.1515/cls-2022-0178>
9. Hu Z., Zhu D., Xiao R., Tao R. Comparative Evaluation of the Immersed-Solid Method for Simulating the Flow Field around Hydrofoil. *Sustainability*. 2023;15(4):3493. <https://doi.org/10.3390/su15043493>
10. Khaware A., Gupta V.K., Srikanth KVSS, Azhar M. Numerical Simulation of Cavitation Flows using Overset Mesh. *The 4th World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer*. 2019. P. 10–12. <https://doi.org/10.11159/icmfht19.108>
11. Khaware A., Sivanandham A., Gupta V.K., Azab M., Scheidegger T. Numerical Simulation of Store Separation Trajectory for EGLIN Test Case Using Overset Mesh. *2018 AIAA Aerospace Science Meeting*. 2018, p. 1272. <https://doi.org/10.2514/6.2018-1272>
12. Pearson C.A., Allen T.D., Battley M.A. Numerical Water Impacts of 2D Hull Forms using Dynamic Overset Meshing. *Journal of Sailing Technology*. 2022;7(01):228–254. <https://doi.org/10.5957/jst/-2022.7.11.228>
13. Rakesh E., Marcelo R., Sidnei O. Analysis of Dynamic Heat Transfer Coefficient in a Reciprocating Compressor by Immersed Solid Method in CFD. *International Compressor Engineering Conference*. 2021. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec> – 12.08.2023.
14. Tominaga Y., Mochida A., Shirasawa T., Yoshie R., Kataoka H., Harimoto K. Cross Comparisons of CFD Results of Wind Environment at Pedestrian Level around a High-rise Building and withing a Building Complex. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2004;3(1):63–70. <https://doi.org/10.3130/jaabe.3.63>

Original article

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/133-142>

Goryachevsky O., Sarycheva O.

OLEG S. GORYACHEVSKY, Deputy Director of A.B. Zolotov Research and Education Center of Computer Modelling, [osgoryachevskij@mail.ru](mailto:osgoryachevskij@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8219-4598>

OLGA S. SARYCHEVA, Student, [olga.sarycheva.2001@mail.ru](mailto:olga.sarycheva.2001@mail.ru)  
National Research Moscow State University of Civil Engineering  
Moscow, Russia

### Verification of immersed body method and overset mesh technique for structural aerodynamics

**Abstract.** The paper presents analysis and verification of approaches to numerical modelling of aerodynamics of thin or small structures as part of buildings or constructions. The immersed body method implemented in ANSYS CFX and the overset mesh technique implemented in ANSYS Fluent are considered. The low accuracy of the immersed body method in the near-field is revealed. The overset mesh technique showed mostly accurate results except for numerical defects at the mesh interface.

**Keywords:** computational fluid dynamics, structural aerodynamics, immersed solid method, overset mesh

**For citation:** Goryachevsky O., Sarycheva O. Verification of immersed body method and overset mesh technique for structural aerodynamics. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023;(4):133–142. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.  
The authors declare no conflict of interests.

### REFERENCES

1. Abalakin I.V., Bakhvalov P.A., Doronina O.A., Zhdanova N.S., Kozubskaya T.K. Modeling of aerodynamics of a moving body defined by immersed boundaries on a dynamically adaptive unstructured grid. *Mathematical modeling*. 2018;30(5):57–75. <https://doi.org/10.1134/S2070048219010034> (In Russ.)
2. Ulyumdzhieva G.V., Tsebikova D.N., Khokholkina L.K., Temyanikova V.A., Bairov B.B. Comparison of methods of numerical modeling of building aerodynamics. *Innovations and Investments*. 2019;(10):293–297. URL: <https://innovazia.ru/upload/iblock/c47/№10%202019.pdf> – 11.08.2023. (In Russ.)
3. Ansys CFX-Solver Theory Guide. ANSYS Inc., 2022. 386 c.
4. Ansys Fluent User's Guide. ANSYS Inc., 2022. 5466 c.
5. Thordal M.S., Bennetsen J.C., Koss H.H.H. Review for practical application of CFD for the determination of wind load on high-rise buildings. *Journal Wind Eng. Ind. Aerodyn*. 2019;186:155–168. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.12.019>
6. Céspedes J.F., Lopez O.D. Simulation and validation of the aerodynamic performance of a quadcopter in hover condition using overset mesh. *AIAA Aviation 2019 Forum*. 2019. <https://doi.org/10.2514/6.2019-2824>
7. Cochran L., Derichson R. A physical modeler's view of Computational Wind Engineering. *Journal Wind Eng. Ind. Aerodyn*. 2011;99:139–153. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2011.01.015>
8. Hamdoon F.O., Jaber A.A., Flaieh E.H. An overset mesh approach for a vibrating cylinder in uniform flow. *Curved and Layered Structures*. 2022;9(1):396–402. <https://doi.org/10.1515/cls-2022-0178>
9. Hu Z., Zhu D., Xiao R., Tao R. Comparative Evaluation of the Immersed-Solid Method for Simulating the Flow Field around Hydrofoil. *Sustainability*. 2023;15(4):3493. <https://doi.org/10.3390/su15043493>
10. Khaware A., Gupta V.K., Srikanth KVSS, Azhar M. Numerical Simulation of Cavitation Flows using Overset Mesh. *The 4th World Congress on Momentum, Heat and Mass Trans-fer*. 2019, p.10–12. <https://doi.org/10.11159/icmfht19.108>

11. Khaware A., Sivanandham A., Gupta V.K., Azab M., Scheidegger T. Numerical Simulation of Store Separation Trajectory for EGLIN Test Case Using Overset Mesh. *2018 AIAA Aero-space Science Meeting*. 2018, p. 1272. <https://doi.org/10.2514/6.2018-1272>
12. Pearson C.A., Allen T.D., Battley M.A. Numerical Water Impacts of 2D Hull Forms using Dynamic Overset Meshing. *Journal of Sailing Technology*. 2022;7(01):228-254. <https://doi.org/10.5957/jst/2022.7.11.228>
13. Rakesh E., Marcelo R., Sidnei O. Analysis of Dynamic Heat Transfer Coefficient in a Recip-rocating Compressor by Immersed Solid Method in CFD. *International Compressor Engi-neering Conference*. 2021. URL: <https://docs.lib.purdue.edu/icec> – 12.08.2023.
14. Tominaga Y., Mochida A., Shirasawa T., Yoshie R., Kataoka H., Harimoto K. Cross Com-parisons of CFD Results of Wind Environment at Pedestrain Level around a High-rise Building and withing a Building Complex. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*. 2004;3(1):63–70. <https://doi.org/10.3130/jaabe.3.63>