

# Проблемно-ориентированная библиотека SOWFA для решения прикладных задач ветроэнергетики

М.В. Крапошин <m.kraposhin@ispras.ru>

С.В. Стрижак <strijhak@yandex.ru>

Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН,  
109004, Россия, г. Москва, ул. А. Солженицына, д. 25

**Аннотация.** В статье рассматриваются возможности открытой библиотеки SOWFA. Проблемно-ориентированная библиотека, работающая в составе открытого пакета OpenFOAM v.2.4.0, предназначена для решения задач ветроэнергетики. В связи со строительством новых ветропарков на территории РФ (Ульяновская область, республика Адыгея) вопросы проектирования, моделирования работы ветропарков и ветроустановок являются актуальными в настоящее время. В статье приводится описание структуры библиотеки SOWFA и некоторых ее классов. Изучение динамики самоорганизованных турбулентных вихревых структур и оценка их размеров важны с точки зрения максимизации вырабатываемой мощности ветроэлектрическими установками (ВЭУ), для анализа оптимального расположения ВЭУ в ветропарке. При этом необходимо детально изучать процесс эжекции воздуха, процесс смещения двух сред, в котором одна среда, находясь под давлением, оказывает воздействие на другую и увлекает ее в требуемом направлении, в районе ветропарке. Явление эжекции играет положительную роль и позволяет восстановить дефицит скорости в следе за ВЭУ, следовательно повлиять на вырабатываемую мощность ветропарка. Явление эжекции можно изучать с помощью движения твердых частиц. В статье описывается пример добавления нового класса KinematicCloud в решатель ABLSolver, который описывает кинематическое облако частиц и пример решения прикладной задачи ветроэнергетики для модельного ветропарка. Расчетная область для модельного ветропарка имела форму параллелепипеда с заданными размерами. Неструктурированная сетка содержала 6 миллионов ячеек. Для определения начального распределения параметров использовалось приближение нейтрального атмосферного пограничного слоя, рассчитанное с применением Precursor метода, реализованного в решателе ABLSolver. Математическое моделирование параметров течения в ветропарке было проведено с использованием решателя pisoFoamTurbine и метода Actuator Line Model. В ходе расчета для случая модельного ветропарка с 12 ветроустановки были получены поля осредненных и пульсационных величин для скорости, для давления, подсеточная вязкость, тензор напряжений, завихренность. В статье выполнено сравнение значения безразмерной горизонтальной скорости в двух различных сечениях со значениями, полученными в эксперименте. Вычисления проведены с использованием ресурсов вычислительного кластера web-лаборатории UniCFD ИСП РАН.

**Ключевые слова:** OpenFOAM; SOWFA; библиотека; модель турбулентности, облако частиц, ветроустановка, ветропарк, ветроэнергетика

**DOI:** 10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-14

**Для цитирования:** Крапошин М.В., Стрижак С.В. Проблемно-ориентированная библиотека SOWFA для решения прикладных задач ветроэнергетики. Труды ИСП РАН, том 30, вып. 6, 2018 г., стр. 259-274. DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-14

## 1. Введение

Открытая библиотека OpenFOAM предоставляет широкие возможности для решения задач механики сплошной среды. Библиотека поставляется в виде исходного кода, написанного на языке программирования C++. Общий объем исходного кода составляет более 1 миллиона строк. Для решения уравнений в частных производных используется метод контрольного объема. Для инженеров существует возможность работы с готовыми решателями, для исследователей – возможность разработки собственных решателей, служебных утилит, а также интеграции библиотеки OpenFOAM с другими открытыми пакетами.

Одно из направлений в механике сплошной среды связано с решением задач в области вычислительной гидродинамики. К там задачам можно отнести задачи в области геофизической гидродинамики, в частности моделирование процессов в атмосферном пограничном слое (АПС). Известно, что для моделирования физических процессов в АПС используются вихреразрешающие методы. Крупномасштабные вихревые структуры рассчитываются при помощи интегрирования фильтрованных уравнений неразрывности, Навье-Стокса, уравнения энергии. Мелкие вихри, размер которых не превышает шага расчетной сетки, моделируются с помощью различных моделей турбулентности, например, лагранжевой динамической модели Смагоринского для подсеточной вязкости. Аппроксимация слагаемых в исходных уравнениях выполняется с первым и вторым порядком точности по времени и пространству. Полученные уравнения для связи скорости и давления решались с помощью итерационного алгоритма PIMPLE. Полученная система алгебраических уравнений для скорости, давления, тензора напряжений и параметров модели турбулентности решается итерационным методом сопряженных градиентов с предобуславливателем.

Основным преимуществом библиотеки OpenFOAM является открытое вычислительное ядро на основе языка программирования C++ [1-2], позволяющее описывать основные объекты вычислительной механики сплошной среды (МСС) и отношения между ними: расчетную область, алгебраические преобразования тензорной и линейной алгебры, алгоритмы интегрирования систем уравнений в частных производных (решатели), численные схемы аппроксимации дифференциальных операторов, вектора, физические поля, матрицы, сетки, численные схемы, модели турбулентности. За счет использования средств метапрограммирования исходный код

решателей OpenFOAM представляет собой описание исследуемых систем уравнений на языке близком к естественному.

## 2. Обзор библиотеки SOWFA

В настоящее время ветроэнергетика является одним из актуальных направлений в области возобновляемых источников энергии. Математическое моделирование позволяет рассчитать мощность ветроустановки и мощность ветропарка в целом с учетом орографии местности, погодных условий, особенностей конструктивного исполнения ветряных турбин, турбулентного переноса импульса. Разработанная в Национальной лаборатории возобновляемой энергии (NREL) на базе математической модели несжимаемых течений OpenFOAM 2.4.0 библиотека SOWFA является реализацией алгоритмов и численных инструментов для комплексного моделирования ветропарков. В составе библиотеки SOWFA имеется несколько проблемно-ориентированных решателей, в том числе для расчёта атмосферного пограничного слоя, решатель ABL Solver, и физических параметров в ветропарке, решатель windPlantSolver, с использованием метода крупных вихрей [5-6]. В составе библиотеки имеется несколько моделей для подсеточной турбулентной вязкости и специальные граничные условия для задания скорости и температуры. Модель Actuator Line Model (ALM), или модель плоских сечений, может быть использована для расчёта течения вблизи вращающихся лопастных турбин на фиксированной расчётной сетке, что значительно экономит вычислительные ресурсы и упрощает процесс счёта. На рис. 1 представлена общая структурная схема библиотеки SOWFA, на рис. 2 – структура класса для описания моделей турбулентности.

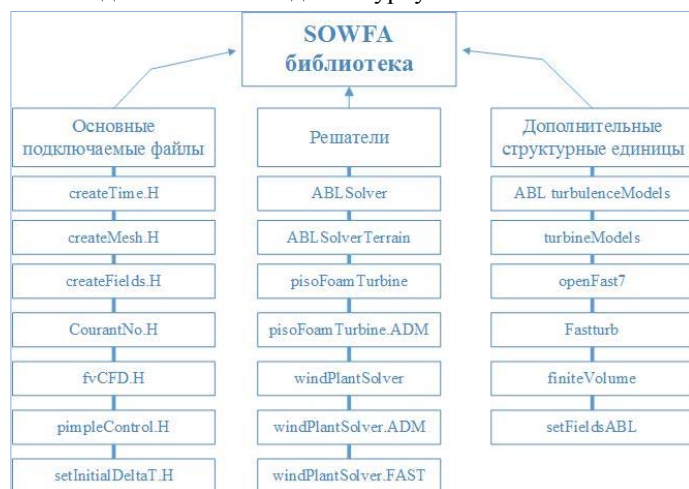


Рис.1 Структура библиотеки SOWFA  
Fig.1 The structure of library SOWFA

Инженерная методика, используемая в модели расчета сил от ветроэнергетической установки (ВЭУ), основана на представлении вращающихся лопастей в виде набора профилей с табулированными коэффициентами аэродинамических сил, в то время как их действие на поток моделируется посредством добавления в уравнение движения аэродинамической силы, спроецированной на расчётную сетку.

В состав базовых модулей входят модули для задания расчетного времени и начального шага по времени, для работы с сеткой, с различными полями, определения числа Куранта, использование алгоритма PIMPLE (гибридный алгоритм PISO/SIMPLE) и другие.

В состав дополнительных структурных единиц входят компоненты для задания моделей подсеточной турбулентной вязкости с учетом влияния атмосферного пограничного слоя, описания моделей турбин (рис. 3), определения правила взаимодействия работы с различными пакетами задач аэроупругости (рис. 4), задания специальных граничных условий, задания параметров горизонтальной ВЭУ.

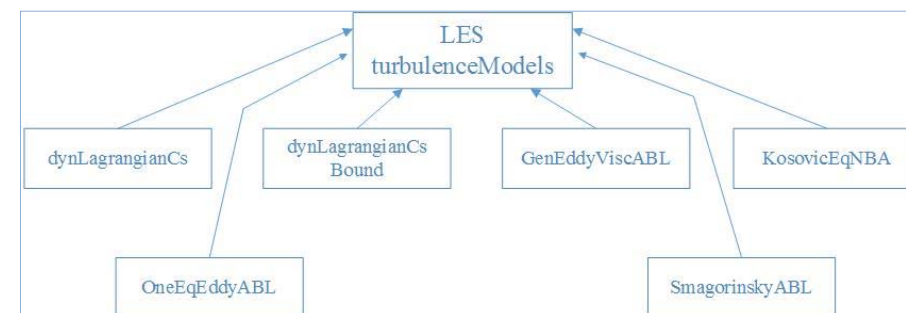


Рис.2 Производные классы SOWFA для описания моделей турбулентности  
Fig.2 SOWFA derived classes for turbulence models

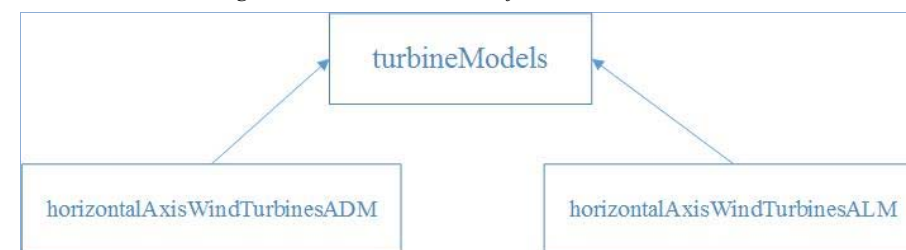


Рис.3 Класс turbineModels для моделей турбин  
Fig.3 The turbineModels class for models of turbine

На рис. 5 показана блок схема для класса, связанного с заданием граничных условия для скорости и температуры с учетом влияние атмосферного пограничного слоя.

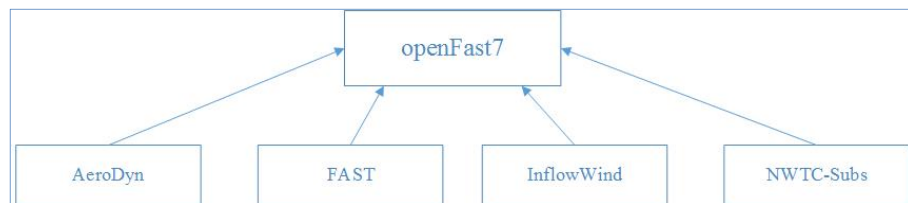


Рис.4 Класс openFast7 для работы с моделями аэроупругости  
Fig.4 The openFast7 class for different FSI solvers

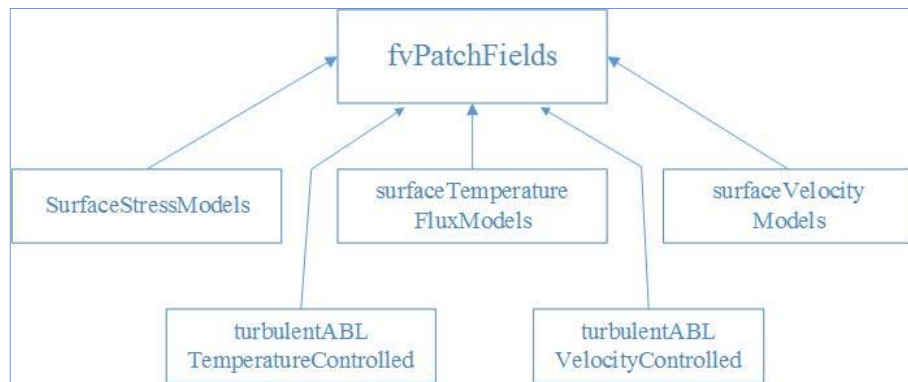


Рис.5 Некоторые специальные граничные условия, используемые в библиотеке SOWFA для описания аэродинамических полей

Fig.5 Some particular boundary conditions of SOWFA library for aerodynamic fields

### 3. Модель облака частиц в составе пакета OpenFOAM

В пакете OpenFOAM для описания движения частиц используется класс KinematicCloud. Схема, иллюстрирующая взаимосвязь основных классов облака частиц, представлена на рис. 6, где стрелками показано наследование классов.

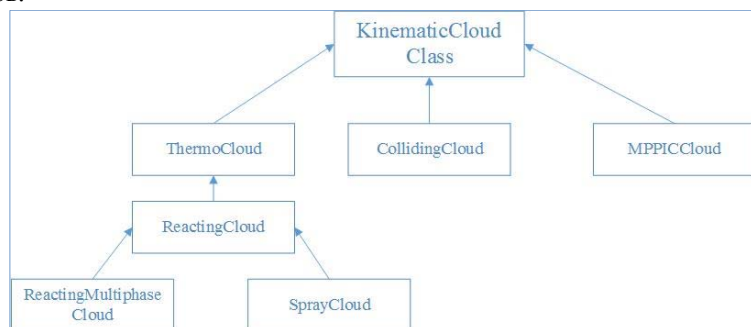


Рис.6 Класс KinematicCloud и производные классы  
Fig.6 The KinematicCloud class and its children

Как видно из схемы, класс KinematicCloud является «базовым» при описании остальных классов, характеризующих различные типы облака частиц. Для единообразного управления облаком частиц в классе введена функция move(), унаследованная от класса KinematicParcel, которая производит физическое перемещение отдельной частицы в соответствии с заданным уравнением движения.

Для описания движения в классе введены структуры, учитывающие различные силы, действующие на частицы:

- выталкивающая сила;
- сила трения;
- разность давления.

Физические модели, используемые при описании облака частиц включают в себя следующие модели и соответствующие им классы:

- модель дисперсии частиц;
- модель инжекции частиц;
- модель взаимодействия частиц с поверхностями;
- стохастическая модель соударений частиц;
- модель поверхностной пленки.

Ниже приведены заложенные в пакете OpenFOAM опции физических моделей класса (указываются в дальнейшем при настройке расчетных кейсов в файлах, описывающих свойства дисперсной фазы):

- CollisionModel – класс моделей соударения; он хранит информацию о точности определения сил плоского взаимодействия с поверхностью, о модели попарного взаимодействия для расчета взаимодействия между двумя частицами, о модели стенки для расчета взаимодействия частиц со стенкой, о списках ячеек, с которыми происходит взаимодействие для каждой ячейки, участвующей во взаимодействиях.
- DispersionModel – класс моделирования дисперсии.

### 3.1 Модель для описания облака частиц

На рис. 7 приведена общая структура класса Injection Model.

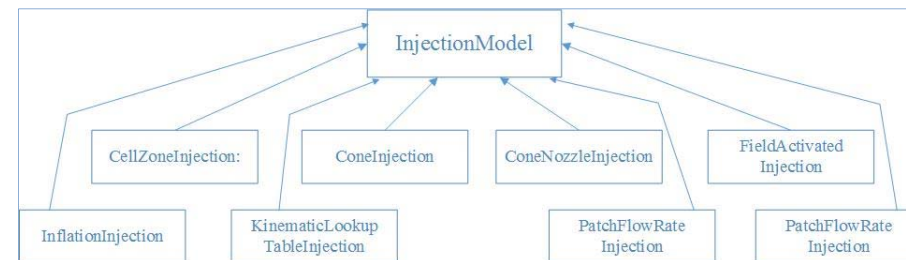


Рис.7 Модель ввода частиц  
Fig. 7 The model for particle's injection

Данный класс включает в себя следующие модели.

1. *CellZoneInjection*: характеризуется плотностью распределения частиц по заданным ячейкам. Исходными данными являются:
  - эффективная плотность распределения частиц в ячейках;
  - общая инжектируемая масса;
  - начальная скорость пакета частиц;
  - диаметры пакетов частиц, получаемые из заданной функции плотности вероятности.
2. *ConeInjection*: описывает инжекцию из конуса. Исходными данным модели являются:
  - время начала инжекции;
  - список координат и направлений инжекторов (по оси инжекции);
  - число пакетов частиц, инжектируемых каждым инжектором;
  - скорости пакетов частиц;
  - внутренний и внешний углы полураствора конусов
  - диаметры пакетов частиц, определяемые в распределении капель по размерам.
3. *FieldActivatedInjection*: описывает инжекцию в заданных точках при выполнении определенного условия.
4. *InflationInjection*: описывает ввод новых частиц путем разделения существующих частиц в генерирующих ячейках.
5. *KinematicLookupTableInjection*: источники частиц задаются в виде таблицы, содержащей параметры о распределении частиц по диаметрам, о массовом расходе и положении инжекции.
6. *ManualInjection*: описывает ручной способ ввода частиц в расчетную область.
7. *PatchFlowRateInjection*, *PatchInjection* описывают ввод частиц через заданную внешнюю границу расчетной области.

## 3.2 Классы описывающие силы, действующие на частицу

Силы сопротивления частицы рассчитываются с использованием следующих моделей:

- модель трения для твердых сфер;
- модель трения для несферических частиц.

Для расчета подъемной силы используются следующие модели:

- модель подъемной силы, применимая для сферических частиц;
- модель подъемной силы, применимая для пузырей изменяемой формы.

На частицу могут действовать и другие силы, описываемые следующими классами:

- *NonInertialFrame*: используется для расчета центробежной силы, связанной с неинерциальностью системы отсчета;

- *Paramagnetic*: используется для расчета силы, действующей на частицы со стороны магнитного поля;
- *PressureGradient*: используется для расчёта силы, вызванной перепадом давлений;
- *SRF*: используется для расчета центробежной силы, прикладываемой к частице при движении во вращающейся системе координат (Single Rotating Frame of Reference);
- *VirtualMass*: используется для расчета силы, прилагаемой к частице вследствие образования дополнительной (виртуальной) массы.

## 3.3. Взаимодействие частиц

Частицы могут взаимодействовать друг с другом и с границами расчетной области. Для учета этого взаимодействия введены следующие классы:

- *Rebound*: модель простого упругого взаимодействия частицы с границей.
- *StandardWallInteraction*: модель взаимодействия со стенкой, включает в себя три опции:
  - *rebound*: упругое взаимодействие, при необходимости возможно определить коэффициенты упругости и восстановления;
  - *stick*: мгновенное прикрепление частицы к поверхности;
  - *escape*: уход частицы, пересекшей границу из расчетной области;
- *StochasticCollisionMode*: описание стохастических соударений частиц.
- *SurfaceFilmModel*: для описания взаимодействия частиц с поверхностью, покрытой тонкой плёнкой.

## 3.4 Классы, наследуемые от класса KinematicCloud

Помимо базового класса KinematicCloud, реализующего базовый функционал для переноса роя частиц, существуют и другие классы, выполняющие специализированные функции:

- класс многофазного моделирования с использованием метода Частица-в-Ячейке (Particle-in-Cell)
- модель облака соударяющихся частиц;
- модель термически неравновесного облака частиц;
- модель облака реагирующих частиц;
- модель термически неравновесного облака реагирующих частиц различного состава;
- модель облака частиц, имитирующего распад (атомизацию) струи.

## 4. Добавление модели облака частиц в исходные уравнения движения и температуры

Изучение динамики самоорганизованных турбулентных вихревых структур и оценка их характерных размеров важны с точки зрения максимизации

вырабатываемой мощности ВЭУ, анализа оптимального расположения ВЭУ в ветропарке. Необходимо детально исследовать процесс эжекции воздуха в районе ветропарке. Явление эжекции позволяет восстановить дефицит скорости в следе за ВЭУ и следовательно положительно повлиять на вырабатываемую мощность ветропарка.

В работе [7] было предложено исследовать трехмерное турбулентное движение воздуха в окрестности ветропарка с помощью облака частиц. В библиотеке SOWFA отсутствует возможность моделирования турбулентного движения газа с частицами, в связи с чем предлагается её добавить. Внесение изменений в реализацию библиотеки в соответствии с предлагаемой модификацией модели также позволяет наглядно продемонстрировать преимущество объектно-ориентированного подхода, в соответствии с которым возможно представление разностных аналогов уравнений в виде исходного кода на языке, близком к естественному.

Другим важным приложением использования моделей движения частиц может быть исследование процесса лёдообразования на лопастях ВЭУ, оказывающего значительное влияние на эксплуатацию ветропарков в областях земного шара, для которых характерными являются времена года с низкими температурами и высокой влажностью воздуха.

С целью объединения моделей аэродинамики ветропарка и облака частиц, добавим в исходный код решателей ABLSolver и windPlantSolver слагаемые, учитывающие движение частиц и их взаимодействие с воздушным потоком.

Внесём изменения в модуль UEqn.H, описывающий уравнение движения воздуха в атмосферном пограничном слое в приближении Буссинеска (выделено жирным шрифтом с подчеркиванием):

```
// Solve the momentum equation
#include "computeCoriolisForce.H"
fvVectorMatrix UEqn
(
    fvm::ddt(U)                // time derivative
  + fvm::div(phi, U)           // convection
  + turbulence->divDevReff(U) // momentum flux
  + fvc::div(Rwall)
  - fCoriolis                  // Coriolis force
  + gradP                      // driving pressure gradient
  - turbines.force()           // turbine body forces
  - parcels.SU(U)             // momentum from particles
);
```

Выделенная строка указывает на добавление слагаемое, отвечающего за вклад в баланс импульса воздуха от частиц.

Поскольку частицы обладать тепловой энергией отличной от тепловой энергии воздуха, необходимо изменить модуль TEqn.H для уравнения температуры воздуха (выделено жирным шрифтом с подчеркиванием):

```
kappat = turbulence->nut()/Prt;
```

```
kappat.correctBoundaryConditions();
volScalarField kappaEff("kappaEff",
                        turbulence->nu()/Pr + kappat);

fvScalarMatrix TEqn
(
    fvm::ddt(T)
  + fvm::div(phi, T)
  - fvm::laplacian(kappaEff, T)
  - fvc::div(qwall)
  - parcels.Sh(T)/(rho*Cp)
);
```

Предполагается, что теплоемкость воздуха  $C_p$  и плотность меняются слабо.

Наконец, для подключения библиотеки переноса облака частиц к решателям необходимо:

- указать соответствующий заголовочный файл: `#include KinematicCloud.H`;
- вызвать процедуру интегрирования уравнений движения частиц облака после решения уравнений аэродинамики: `parcels.evolve()`.

## 5. Пример расчета с использованием библиотеки SOWFA

Для тестирования возможностей библиотеки SOWFA была выбрана модельная задача с ветропарком в составе 12 имитаторов ветроустановок (ВЭУ), расположенных в 4 ряда. Размеры модельных ветроустановок выбирались на основе данных из эксперимента работы [8]. Пространственная вычислительная область представляла собой прямоугольный параллелепипед с размерами 6 метров по оси X, 5 метров по оси Y, 1 метр по оси Z (по вертикали). Размер получившейся неструктурированной сетки составил 6 миллионов ячеек. На верхней границе задавалось граничное условие проскальзывания, а на боковых границах - циклическое граничное условие. На входе расчетной области задавался логарифмический профиль скорости, полученный из данных ветромониторинга, на твердой поверхности использовалась модель пристеночной функции согласно теории подобия Монино-Обухова.

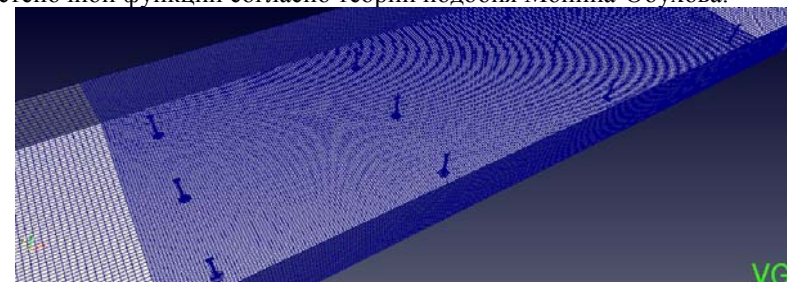


Рис. 8. Расчетная область и сетка с 12 ВЭУ

Fig. 8 Numerical domain and grid with 12 wind turbines

Неструктурированная сетка имела 6 миллионов ячеек. По результатам расчета были получены поля скорости, завихренности, давления, турбулентной



вязкости, спектр кинетической энергии турбулентности. Более подробную информацию по этой задаче можно найти в работе [11]. Результаты расчета (профили безразмерной скорости в различных сечениях в следе за ветроустановками, а также по значения коэффициентов мощности и осевой силы тяги ветроустановки) сравнивались с результатами эксперимента [9,10]. Данные исследования проводились с целью разработки методики для расчета параметров течения для действующего ветропарка в Ульяновской области РФ с 28 ВЭУ.

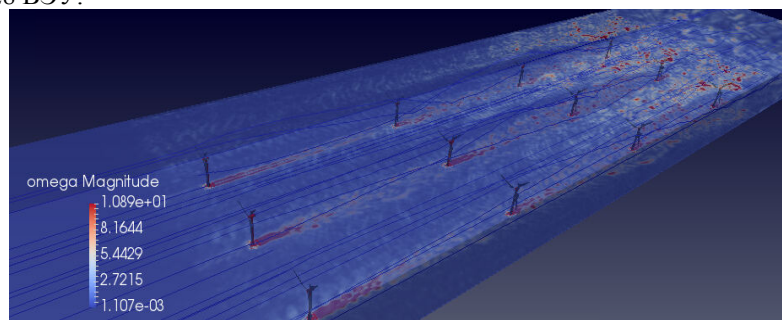


Рис.9 Поле модуля завихренности в момент времени  $t=20$  секунд  
Fig. 9. The vorticity magnitude field at time = 20 seconds

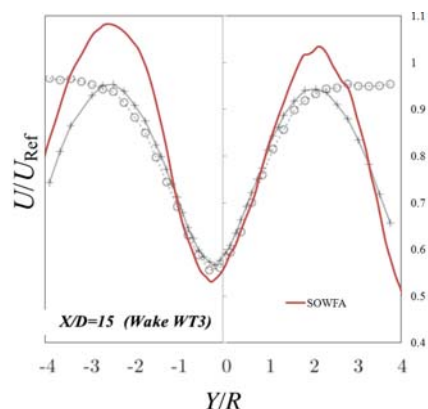


Рис.10. Профиль безразмерной горизонтальной скорости на расстоянии  $X/D=15$ , где  $X$  является расстоянием от ВЭУ,  $D$  является диаметром ВЭУ. Красная линия – расчет с использованием SOWFA, линия с круглыми маркерами – эксперимент для ряда из четырех турбин, линия с крестами – эксперимент для массива из 12 (3x4) турбин  
Fig. 10. The normalized horizontal velocity  $U/U_{ref}$  profiles behind the wind turbines of the central row in section  $X/D=15$ , where  $X$  is the distance from the first wind farm,  $D$  is the diameter of the wind turbines. Red line – calculation with SOWFA, line with circles – experiment for single line of 4 turbines, line with crosses – experiment for array of 12 (3x4) turbines

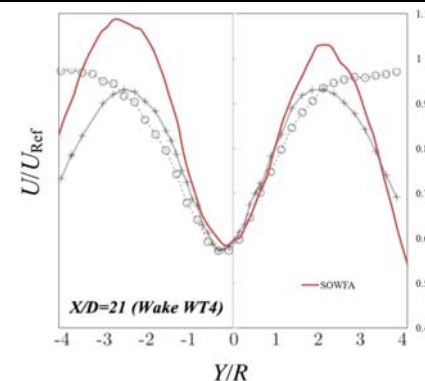


Рис.11 Профиль безразмерной горизонтальной скорости на расстоянии  $X/D=15$ , где  $X$  является расстоянием от ВЭУ,  $D$  является диаметром ВЭУ. Красная линия – расчет с использованием SOWFA, линия с круглыми маркерами – эксперимент для ряда из четырех турбин, линия с крестами – эксперимент для массива из 12 (3x4) турбин  
Fig. 11 The normalized horizontal velocity  $U/U_{ref}$  profiles behind the wind turbines of the central row in section  $X/D=15$ , where  $X$  is the distance from the first wind farm,  $D$  is the diameter of the wind turbines. Red line – calculation with SOWFA, line with circles – experiment for single line of 4 turbines, line with crosses – experiment for array of 12 (3x4) turbines

Для определения начального распределения физических величин использовалось приближение нейтрального атмосферного пограничного слоя, рассчитанное с применением Precursor метода, реализованного в решателе ABLSolver. Таким образом, для задания начальных данных на входе расчетной области с заданными размерами использовались значения нестационарных физических величин. Время моделирования задавалось исходя из условия 2-х кратного прохождения потоком расчетной области.

Математическое моделирование параметров течения в ветропарке было проведено с использованием решателя pisoFoamTurbine и метода Actuator Line Model. Достоверность и точность выбранного решателя проверялась на задачах с одной, двумя и двенадцатью модельными ветроустановками [9-11].

Дополнительно был проведен расчет значения безразмерной горизонтальной скорости в различных сечениях и проведено сравнение с результатами эксперимента (рис. 10, 11). В результате получено хорошее совпадение с результатами эксперимента.

В работах [10-11] с помощью программы ImaCalc проводилась оценка величины фрактальной размерности турбулентного течения в вихревом следе для ВЭУ и оценка мультифрактального спектра турбулентности в разных сечениях за ВЭУ. Данные параметры могут быть использованы в формуле для расчета спектра кинетической энергии в ветропарке с учетом влияния стратификации в атмосферном пограничном слое.

## 6. Заключение

В статье рассмотрены возможности открытого пакета OpenFOAM для решения прикладных задач механики сплошной среды в области энергетики, в том числе возобновляемой. Исследование процессов турбулентного движения в ветропарке предложено осуществлять с применением средств отслеживания облака частиц. Приведено описание структуры открытой библиотеки SOWFA для решения задач ветроэнергетики. В статье приведен пример добавления модели облака частиц в состав решателя ABLSolver и windPlantSolver. Выполнено описание базового класса KinematicCloud для описания движения облака частиц. Для демонстрации работы библиотеки SOWFA представлены результаты расчета поля завихренности, безразмерной горизонтальной скорости для модельного ветропарка с 12 ВЭУ. Вычисления были проведены с использованием ресурсов вычислительного кластера web-лаборатории UniCFD ИСП РАН. Для расчета одного примера было использовано от 72 до 96 вычислительных ядер.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-07-01391) и Программы Президиума РАН № 26.

## Список литературы

- [1] Прата С. Язык программирования C++. Лекции и упражнения. Вильямс, 2012, 1248 стр.
- [2] Страуструп Б. Язык программирования C++. Специальное издание. Бином, 2017, 1136 с.
- [3] Weller H.G., Tabor G., Jasak H., Fureby C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object oriented techniques. *Computers in Physics*, vol.12, № 6, 1998, pp. 620-631.
- [4] Churchfield M.J., Lee S., Michalakes J., Moriarty P.J. A numerical study of the effects of atmospheric and wake turbulence on wind turbine dynamics. *Journal of Turbulence*, vol. 13, no. 14, 2012, pp. 1–32.
- [5] Breton S.-P., Sumner J., Sørensen J.N., Hansen K.S., Sarmast S., Ivanell S. A survey of modelling methods for high-fidelity wind farm simulations using large eddy simulation. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 375, issue 2091, 2017.
- [6] Sagaut P. Large eddy simulation for incompressible flows: an introduction. Springer, Berlin, 2002, 426 p.
- [7] Andersen S.J., Sørensen J.N., Mikkelsen R.F. 2017 Turbulence and entrainment length scales in large wind farms. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 375, issue 2091, 2017.
- [8] Hancock P.E., Farr T.D. Wind-tunnel simulations of wind-turbine arrays in neutral and non-neutral winds. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 524, conference 1, 2014.
- [9] Strijhak S., Redondo J.M., Tellez-Alvarez J. Multifractal analysis of a wake for a single wind turbine. In *Proc. of the Conference on Topical Problems of Fluid Mechanics*, 2017. pp. 275-284.

- [10] Kryuchkova A., Tellez-Alvarez J., Strijhak S., Redondo J.M. Assessment of Turbulent Wake Behind two Wind Turbines Using Multi-Fractal Analysis. In *Proc. of the Ivannikov ISPRAS Open Conference*, 2017. DOI: 10.1109/ISPRAS.2017.00025.
- [11] Strijhak S.V., Koshelev K.B., Kryuchkova A.S. Studying parameters of turbulent wakes for model wind turbines. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2027, issue 1.

## The problem-oriented library SOWFA for solving the applied tasks of wind energy

M.V. Kraposhin <m.kraposhin@ispras.ru>,  
S.V. Strijhak <strijhak@yandex.ru>

*Ivannikov Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences,  
25, Alexander Solzhenitsyn st., Moscow, 109004, Russia*

**Abstract.** The article discusses the possibilities of the open source library SOWFA. The problem-oriented library, operating as part of the open source package OpenFOAM v.2.4.0, is intended for solving wind energy's problems. In connection with the construction of new wind farms in the Russian Federation (Ulyanovsk region, The Republic of Adygea), the issues of designing and modeling the operation of wind farms and wind turbines are currently relevant. The article describes the structure of the SOWFA library and some of its classes. The study of the dynamics of self-organized turbulent structures and the assessment of their size are important from the point of view of maximizing the power generated by wind turbines, for analyzing the optimal location of wind turbines in wind farm. At the same time, it is necessary to study in detail the process of air's ejection, the process of displacement of two media, in which one medium, being under pressure, affects the other and carries it in the required direction, in the area of the wind farm. The phenomenon of ejection plays a positive role and allows restoring the velocity's deficit in the wake of the wind turbine, therefore, affects the wind capacity of wind farm. The phenomenon of ejection can be studied using the motion of solid particles. The article describes an example of adding a new KinematicCloud class to the ABLSolver solver, which describes a kinematic cloud of particles and an example of solving an applied wind energy problem for a model wind farm. The numerical domain for the model wind farm had the shape of a parallelepiped with given dimensions. The unstructured mesh contained 6 million cells. To determine the initial distribution of parameters, we used the neutral atmospheric boundary layer approximation, calculated using the Precursor method, implemented in the ABLSolver solver. The mathematical modeling of the flow parameters in the wind farm was done using the pisoFoamTurbine solver and the Actuator Line Model. In the course of calculation, for the case of a model wind farm with 12 wind turbines, the fields of averaged and pulsation values were obtained for velocity, pressure, subgrid scale viscosity, stress tensor, vorticity. The article compares the values of the dimensionless horizontal velocity in two different sections with the values obtained in the experiment. The calculations were performed using the resources of the high performance cluster of the UniCFD web-laboratory in ISP RAS.

**Keywords:** OpenFOAM; SOWFA; library; model of turbulence; cloud of particles; wind turbine; wind farm; wind energy

**DOI:** 10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-14

**For citation:** Kraposhin M.V., Strijhak S.V. The problem-oriented library SOWFA for solving the applied tasks of wind energy. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 30, issue 6, 2018, pp. 259-274 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2018-30(6)-14

## References

- [1] Prata S. C++ Primer Plus. Addison-Wesley Professional, 2012, 1440 p.
- [2] Stroustrup B. The C++ Programming Language. Addison-Wesley Professional, 2013, 1376 p.
- [3] Weller H.G., Tabor G., Jasak H., Fureby C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using object oriented techniques. *Computers in Physics*, vol.12, № 6, 1998, pp. 620-631.
- [4] Churchfield M.J., Lee S., Michalakes J., Moriarty P.J. A numerical study of the effects of atmospheric and wake turbulence on wind turbine dynamics. *Journal of Turbulence*, vol. 13, no. 14, 2012, pp. 1–32.
- [5] Breton S.-P., Sumner J., Sørensen J.N., Hansen K.S., Sarmast S., Ivanell S. A survey of modelling methods for high-fidelity wind farm simulations using large eddy simulation. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 375, issue 2091, 2017.
- [6] Sagaut P. Large eddy simulation for incompressible flows: an introduction. Springer, Berlin, 2002, 426 p.
- [7] Andersen S.J., Sørensen J.N., Mikkelsen R.F. 2017 Turbulence and entrainment length scales in large wind farms. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 375, issue 2091, 2017.
- [8] Hancock P.E., Farr T.D. Wind-tunnel simulations of wind-turbine arrays in neutral and non-neutral winds. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 524, conference 1, 2014.
- [9] Strijhak S., Redondo J.M., Tellez-Alvarez J. Multifractal analysis of a wake for a single wind turbine. In *Proc. of the Conference on Topical Problems of Fluid Mechanics*, 2017. pp. 275-284.
- [10] Kryuchkova A., Tellez-Alvarez J., Strijhak S., Redondo J.M. Assessment of Turbulent Wake Behind two Wind Turbines Using Multi-Fractal Analysis. In *Proc. of the Ivannikov ISPRAS Open Conference*, 2017. DOI: 10.1109/ISPRAS.2017.00025.
- [11] Strijhak S.V., Koshelev K.B., Kryuchkova A.S. Studying parameters of turbulent wakes for model wind turbines. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2027, issue 1.