

Разработка средств управления моделированием на базе решателя driftFluxFoam платформы OpenFOAM

Д. И. Читалов

Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского отделения РАН, Челябинская обл., г. Миасс, Ильменский заповедник, Россия

Аннотация. В статье освещаются вопросы расширения возможностей графической оболочки для программного комплекса OpenFOAM путем подключения модуля для управления численным моделированием в области механики сплошных сред посредством программы-решателя driftFluxFoam. Проанализированы существующие подходы к решению проблемы отсутствия графического интерфейса пользователя для OpenFOAM, определены их недостатки, доказана актуальность проводимого исследования. Выделены основные компоненты статьи: тема исследования, цели и задачи, результаты, новизна работы и предполагаемая практическая ценность. Представлен и аргументирован технологический стек, средствами которого достигнута цель исследования, выделены особенности и преимущества каждой технологии. Приведена диаграмма, демонстрирующая пошаговый процесс работы пользователя с продуктом. Описаны этапы проведения численного эксперимента с помощью предложенной графической оболочки и решателя driftFluxFoam. Выделены ключевые приемы, предложенные автором, и отличающие текущий продукт от ближайших аналогов. Подтверждена возможность применения выбранного стека для достижения целей разработки, сформулированы основные направления для дальнейших исследований в рассматриваемой тематике.

Ключевые слова: численное моделирование, механика сплошных сред, графический интерфейс пользователя, OpenFOAM, решатель driftFluxFoam.

DOI 10.14357/20718632240211

EDN ZOITZE

Введение

В статье, продолжающей цикл работ под общей формулировкой «Разработка графической оболочки для программного комплекса OpenFOAM», рассматриваются теоретико-методологические положения и практика расширения возможностей приложения за счет создания и подключения дополнительных программных модулей. Изучается вопрос разработки модуля, автоматизирующего процесс проведения численных экспериментов на базе программы-решателя driftFluxFoam. Каждый из решателей

соответствует определенной численной модели интегрирования дифференциальных уравнений в частных производных, основанной на методе конечного объема. В программном комплексе OpenFOAM [1] реализована возможность проведения всех этапов численного моделирования задач механики сплошных сред (МСС): подготовки расчетного случая, обработки и постобработки.

Проблема заключается в том, что управление экспериментом пользователь осуществляет вручную в окне терминала, что может показаться сложным, неудобным и приводит к увеличению затрат времени. К настоящему времени

компания-разработчик OpenFOAM не решила проблему отсутствия встроенного графического интерфейса, поэтому инженеры и исследователи вынуждены пользоваться сторонними графическими оболочками, которые подключаются к программному комплексу OpenFOAM. Среди таких продуктов стоит отметить Salome [2], Helyx-OS [3], Visual-CFD [4]. Указанные программные решения эффективно справляются со своей задачей, но для отечественных специалистов работа с ними сопряжена с определенными сложностями, например, с отсутствием русифицированного меню и документации, с необходимостью приобретать услуги технической поддержки. Кроме того, представленные программные продукты разработаны зарубежными компаниями, а на отечественном рынке ПО в настоящее время реализуется стратегия импортозамещения. Следовательно, вопрос проектирования отечественной версии графической оболочки для OpenFOAM сохраняет актуальность.

Российские программисты до определенного момента проявляли интерес к проблеме, представив научному сообществу ряд собственных разработок. Результаты их исследований опубликованы в ряде научных работ в 2016-2017 гг. [5-6], но перспектива применения предложенных продуктов вызывает вопросы, поскольку авторы более не издавали трудов о продолжении исследований по данной тематике. С большой долей вероятности речь идет о демонстрационных версиях приложений, которые не были выведены на профессиональный уровень. Также авторы отмечают, что пользователю необходимо самостоятельно расширять функциональность продуктов, что представляет весьма трудоемкий процесс.

Первоначально OpenFOAM предусматривал проведение исключительно прочностных расчетов, но к текущему моменту включает компоненты для решения задач гидро-, газо-, электро- и термодинамики. Также позволяет проводить эксперименты в области моделирования динамики твердого тела, решения задач горения и др. Перечень исследуемых проблем МСС расширяется с обновлением OpenFOAM. Теперь стандартный дистрибутив платформы включает более 25 решателей, при запуске каждого из которых осуществляется расчет параметров

задачи в различные временные точки. Общая продолжительность решения определяется прежде всего выбранной математической моделью и сложностью геометрии расчетной области. Также, на общее время численного эксперимента могут влиять и другие факторы, в частности выбранный механизм подготовки расчетного случая, и здесь преимущество на стороне графической оболочки с традиционными экранными формами.

Автор работает над задачей создания программы, обеспечивающей взаимодействие пользователя с пакетом OpenFOAM с 2015 г., и, помимо базовой версии графической оболочки [7], представил набор дополнительных программных модулей, каждый из которых направлен на реализацию в графической оболочке новой функциональности, например, возможности генерации расчетных сеток, численного моделирования новых типов задач МСС, проведения различных вариантов постобработки [8-10]. Благодаря разработанному продукту специалисту не требуется применять окно терминала для указания команд. Все действия осуществляются через привычные экранные формы и графические элементы управления – виджеты. За счет выбора многослойной архитектуры для реализации базовой версии приложения процесс дополнения продукта новыми компонентами значительно упрощается, а пользователю не требуется вручную формировать структуру каждого расчетного случая. В графическую оболочку уже заложены алгоритмы, обеспечивающие создание необходимых служебных файлов в зависимости от типа моделируемой задачи МСС.

Вследствие открытости исходного кода программного комплекса OpenFOAM инженеры и исследователи способны дополнять дистрибутив собственными решателями, что требует также обновлений и опций графической оболочки. В связи с этим автором принято решение доработать предложенную версию графической оболочки путем создания и подключения модуля для решателя *driftFluxFoam*. Помимо доработки программных алгоритмов необходимо модифицировать и графическую составляющую продукта. Также должна быть обеспечена возможность отображения численной модели посредством встроенного визуализатора *ParaView* [11].

1. Назначение программы-решателя driftFluxFoam

Как было отмечено выше, при достаточной квалификации инженер, обладающий навыками программирования, может использовать в работе не только стандартные решатели, но и создавать собственные на базе библиотек OpenFOAM. Данный программный комплекс позволяет получать решения задач МСС с участием ньютоновских вязких жидкостей как в несжимаемом, так и в сжимаемом приближении с учетом конвективного теплообмена и действия гравитационных сил [12].

Одним из таких решателей является программа driftFluxFoam, применяемая для моделирования задач МСС с участием двух несжимаемых жидкостей. Решатель использует смешанный подход с приближением дрейфового потока для относительного движения фаз и предназначен для моделирования осаждения дисперсной фазы и других подобных проблем разделения. Если говорить о решателе детально, то создаваемая с его помощью модель основана на модели дрейфового потока, где уравнения сохранения Эйлера используются для массы и импульса смеси вместе с уравнением конвекционной диффузии для моделирования распределения дисперсной фазы. Определяющие соотношения используются для моделирования относительного движения между фазами [13].

Реологическое воздействие дисперсной фазы на смесь и накопленного осевшего слоя дисперсной фазы моделируется с использованием рецептуры разжижающегося при сдвиге пластика Бингема. Эмпирические зависимости применяются для моделирования зависящих от концентрации физических свойств скорости осаждения, предела текучести и пластической вязкости. Эффекты турбулентности моделируются с использованием модели турбулентности, модифицированной двумя уравнениями плавучести [13].

Чтобы получить решение полученного набора нелинейных уравнений в частных производных, применяется метод дискретизации конечного объема с использованием алгоритма PISO. Это сочетается со специально разработанной процедурой коррекции давления: здесь гидростатическое давление рассматривается

отдельно, а градиент плотности на поверхности ячейки рассчитывается непосредственно по узлам по обе стороны от поверхности ячейки [13].

Эффективность модели оценивается путем ее применения к трем случаям валидации с использованием суспензий активного ила в качестве рабочей среды. Это эксперимент с участием модельного или полномасштабного резервуара и измерением скорости и концентрации дисперсной фазы. Проведенные эксперименты оказались весьма продуктивными: параметры скорости и концентрации в целом были хорошо предсказаны в рамках итоговой численной модели [13].

2. Постановка цели и задач

В рамках проводимого исследования предполагается достичь расширения исходного кода базовой версии графической оболочки OpenFOAM_GUI в части реализации доступа специалиста к программным и графическим средствам управления численным экспериментом на базе программы-решателя driftFluxFoam. Успешная разработка модуля должна способствовать оптимизации рабочего времени пользователей в рамках проведения экспериментов, а также упрощению процесса подготовки расчетного случая от этапа препроцессинга до запуска решателя и утилит постобработки.

Процесс достижения обозначенной цели включает следующий перечень задач в части как программной, так и графической составляющих.

1) Разработать макет экранной формы для каждого из служебных файлов расчетного случая. Макет представить в виде набора выражений выбранного языка программирования и библиотеки графических элементов. Полученный программный код сохранить в файле с расширением «.ру». Макет должен представлять собой привычную экранную форму с графическими элементами управления – кнопками, текстовыми полями, выпадающими списками и т.д.

2) Разработать и выполнить в виде программного кода механизм передачи введенных пользователем параметров из форм в служебные файлы расчетного случая. Соответствующий программный код также должен размещаться в файлах с расширением «.ру».

3) Разработать и подключить к текстовым полям каждого макета экранной формы

механизм валидации введенных пользователем параметров перед их сохранением.

4) Разработать и перенести на программный код механизм проверки структуры расчетного случая на наличие необходимых служебных файлов перед запуском программы-решателя driftFluxFoam.

5) Реализовать корректную взаимосвязь графической и программной составляющих модуля и подключить его к базовой версии приложения, обеспечив возможность переключения между решателями при подготовке расчетного случая.

6) Подготовить и реализовать в виде команд выбранного языка программирования механизм создания нескольких версий служебных файлов расчетного случая для обеспечения возможности проведения экспериментов в различных условиях.

3. Стек технологий

На начальном этапе создания программного продукта важной задачей является грамотный выбор стека технологий, на базе которых предполагается реализовать графическую (фронтенд), программную часть (бэкенд) и систему хранения данных (СУБД).

- Фронтенд. Видимая часть приложения, его клиентская часть. Через нее пользователь взаимодействует с программой, отдает команды, указывает входные параметры. В приложениях на Python графическая часть продукта создается на базе кроссплатформенного фреймворка PyQt. Он отличается наличием множества стандартных классов-виджетов, возможностью настройки макетов форм и многочисленным сообществом пользователей [14].

- Бэкенд. Это движок, логика работы приложения, скрытая от пользователя, и отвечающая за непосредственное выполнение программой своих задач. Среди прочих языков программирования Python, благодаря простоте, гибкости, наличию дополнительных библиотек, занимает лидирующие позиции по популярности. Принято решение все компоненты графической оболочки, включая новые модули, реализовать с его помощью [15].

- Система хранения данных. Это компонент для манипулирования вводимыми пользователем данными, в частности для их сохранения и

загрузки. Для настольных Python-проектов с многослойной архитектурой оптимальным вариантом является СУБД SQLite, предусматривающая сохранение данных в традиционном табличном формате [16]. Предполагается для каждого служебного файла расчетного случая создавать соответствующую таблицу базы данных.

На процесс разработки также влияют сопутствующие факторы. К ним относится, например, выбор оптимальной среды для написания и отладки кода. Для Python-проектов положительно себя зарекомендовала свободно распространяемая среда PyCharm Community Edition, оснащенная необходимыми средствами для комфортной подготовки программного кода [17].

Стоит также отметить ПО, без которого невозможно использование как базовой версии графической оболочки, так и создаваемого модуля. Это непосредственно программный комплекс OpenFOAM и визуализатор результатов научных экспериментов ParaView. Что касается платформы, на которой функционирует OpenFOAM, то изначально он разрабатывался под ОС Linux, например, под дистрибутивы Debian и Ubuntu. Но в настоящее время доступны версии OpenFOAM и под ОС Windows 10. Также необходимо отметить и характеристики вычислительного устройства. Задачи МСС, моделируемые с помощью OpenFOAM, могут находиться в состоянии решения продолжительное время, поэтому нужно позаботиться об устройстве с достаточной вычислительной мощностью.

4. Логика работы модуля

Благодаря представленному модулю в распоряжении пользователя находится программное средство, автоматизирующее проведение всех этапов численного моделирования задач МСС посредством OpenFOAM, включая создание директории расчетного случая.

Препроцессинг (подготовительный этап). Включает формирование геометрии модели и дискретизацию расчетной области. Это непосредственно генерация сеточной модели. Подготовка области решения завершается формулированием начальных и граничных условий, а также указанием необходимых физических свойств задачи и численных схем решения. Далее настраиваются параметры контроля

времени, чтения и записи данных. Указанные свойства задаются в соответствующих служебных файлах расчетного случая. Далее применяется одна из стандартных сеточных утилит, например, blockMesh.

Обработка (основной этап). Это сам процесс численного моделирования задачи МСС. Специалист осуществляет запуск программы-решателя и расчет системных параметров в различные временные точки. В качестве решателя используется уже описанный ранее driftFluxFoam.

Постпроцессинг (вспомогательный этап). Предполагает обработку и анализ результатов моделирования. Начинается с конвертации результатов расчета в формат, подходящий для отображения и визуализации. Далее в работу вступает пакет-визуализатор ParaView, формирующий результат отображения в виде

графиков и контурных схем, привязанных к исходной геометрии. На этом этапе пользователь анализирует итоговую численную модель и оценивает ее соответствие заявленным требованиям. Важно отметить, что при отклонении итогового результата от необходимого пользователь может вернуться к редактированию исходных параметров и повторному выполнению всех этапов.

Резюмируя вышесказанное, отметим: перед запуском программы-решателя driftFluxFoam осуществляется препроцессорный этап, на котором создается директория расчетного случая с определенной структурой служебных файлов с параметрами сетки, физическими свойствами исследуемой системы, краевыми условиями и т.д. На Рис 1. приведена диаграмма, демонстрирующая пошаговый процесс работы с рассматриваемым модулем.

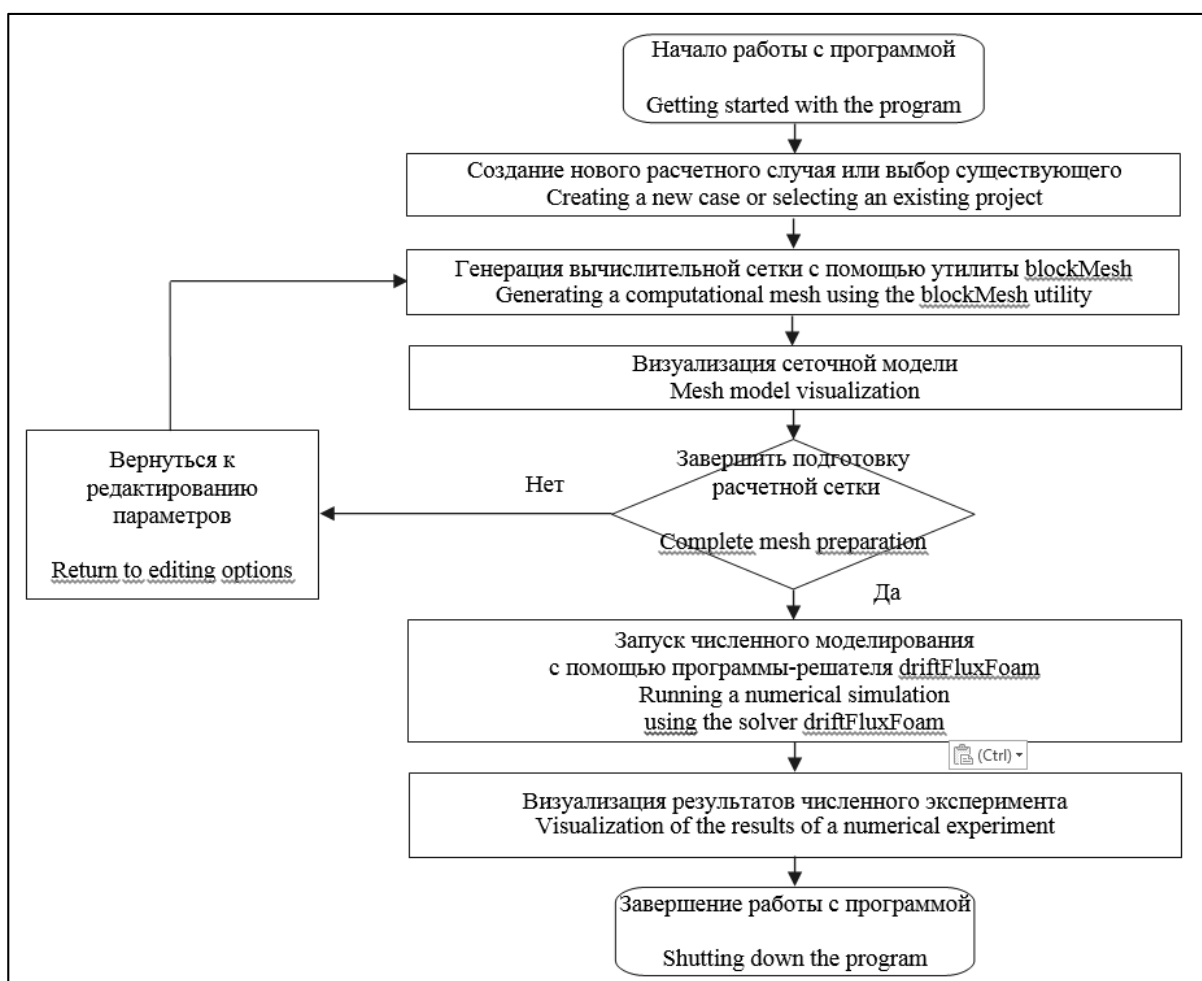


Рис. 1. Блок-схема взаимодействия пользователя с модулем для решателя driftFluxFoam программного комплекса OpenFOAM

5. Результаты

При подготовке публикации выполнен анализ существующих разработок по указанной тематике, выявлены их слабые стороны, подтверждена актуальность проведения исследования. Выполнена модификация исходного кода первоначальной версии оболочки для программного комплекса OpenFOAM путем проектирования и подключения графической и программной составляющих, автоматизирующих подготовку расчетного случая для работы с программой-решателем driftFluxFoam. Обновленная версия продукта загружена в дистрибутив проекта на портале GitHub [18], тем самым в рамках выполненного исследования расширен исходный код и самого программного комплекса OpenFOAM.

Благодаря переходу с консольного подхода на графический, с пользователя снимаются многие задачи, которые ранее нужно было выполнять вручную, в частности, создание служебных директорий и файлов с расчетными параметрами. Графическая оболочка делает процесс

подготовки и проведения эксперимента удобным и понятным для специалиста, минимизирует вероятность ошибок моделирования, способствует экономии рабочего времени. На Рис. 2 приведено изображение главного окна приложения с подключенным модулем для решателя driftFluxFoam на этапе постобработки. Доработанное приложение протестировано на примере задачи MCC Tank3D. Эксперимент предполагает построение численной модели 3D-волнового резервуара. По результатам специалист формулирует выводы об изменениях гидродинамических характеристик тела под воздействием внешних условий. Подобные эксперименты могут осуществляться на предприятиях отраслей кораблестроения и ракетостроения. Продукт находится на стадии тестирования специалистами конструкторских подразделений АО ГРЦ им. Макеева [19], под задачи которого ведется его создание. Определяются возможные недостатки, осуществляется рефакторинг исходного кода.

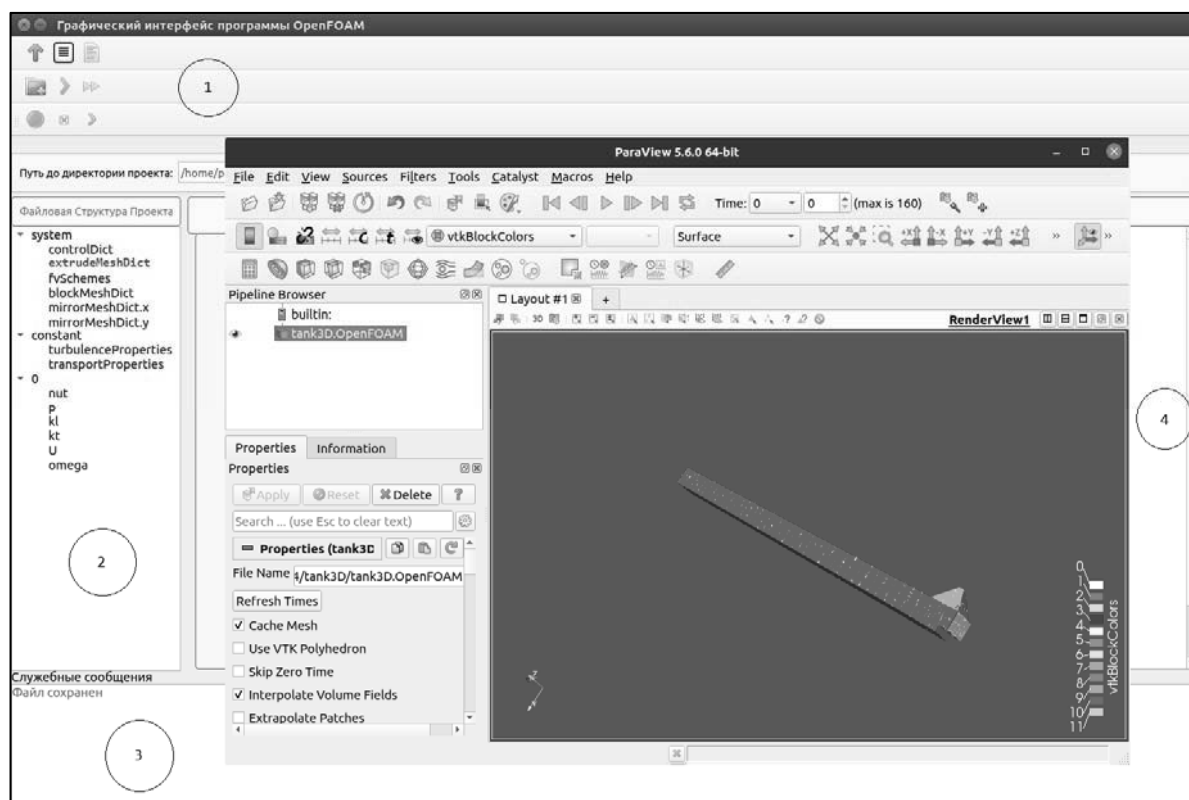


Рис. 2. Главное окно интерфейса OpenFOAM

1 – панель управления численным экспериментом, 2 – дерево (структура) расчетного случая,
3 – строка состояния, 4 – панель ввода параметров задачи MCC

6. Предложенные подходы

По итогам выполненных исследовательских работ автором сформулированы и реализованы методики, обеспечивающие выполнение поставленных задач и достижение конечной цели разработки. Их можно охарактеризовать в качестве положений, определяющих научную новизну исследования.

Сериализация расчетных параметров. Предполагает конвертацию параметров задачи МСС в формат, оптимальный для размещения в таблицах реляционной СУБД. Обратный процесс также возможен, что позволяет при необходимости редактировать расчетные характеристики задачи. В проекте, предложенном отечественными авторами [5], параметры задачи сохраняются в традиционных текстовых файлах. Это требует реализации дополнительных алгоритмов по парсингу и представлению этих параметров.

- **Вариативность служебных файлов.** Важное дополнение, предложенное автором, и позволяющее для выбранного расчетного случая устанавливать актуальный служебный файл с определенным набором значений свойств. При необходимости специалист может переключаться между файлами, тем самым обеспечивая возможность построения численных моделей применительно к различным условиям.

- **Валидация вводимых параметров.** В элементах управления традиционных экранных форм по умолчанию отсутствует опция проверки типов данных вводимых параметров. В предложенной графической оболочке и подключенном модуле валидация достигается привязкой к элементам управления PyQt-валидаторов. В продуктах, предложенных отечественными разработчиками, наличие аналогичной опции не отмечено [5].

- **Проверка комплектности расчетного случая.** Благодаря этому подходу выполнение основного этапа численного эксперимента, т.е. запуска программы-решателя, невозможно без сканирования директории расчетного случая на предмет наличия служебных файлов, контролирующей генерацию расчетной сетки, управляющих физическими параметрами и граничными условиями задачи.

Стоит также отметить, что разработчики продуктов-аналогов предлагают пользователям для

расширения возможностей своих программных средств самостоятельно создавать и подключать дополнительные компоненты, что может быть затруднительным и требовать наличия специальной подготовки [5]. Приложение, предложенное автором, не требует вмешательства пользователя, и совершенствуется автором по мере обновления дистрибутива OpenFOAM.

Заключение

Получены результаты экспериментальных исследований в проекте по доработке графической оболочки для программного комплекса OpenFOAM. Достигнута главная цель – создан и интегрирован с базовой версией приложения дополнительный модуль, предоставляющий пользователю графические и программные средства для управления численным моделированием на базе программы-решателя driftFluxFoam.

Автором сформулированы и реализованы оригинальные идеи, отличающие приложение от продуктов-аналогов, представленных на отечественном рынке. Проведено испытание модифицированной версии графической оболочки в рамках эксперимента по моделированию одной из базовых задач МСС, входящих в дистрибутив OpenFOAM. Созданное приложение способно принести пользователю экономию рабочего времени при подготовке расчетного случая и минимизировать вероятность ошибок. Благодаря переходу к графическим средствам управления процессом численного моделирования повышено также и удобство пользователя.

В рамках достижения сформулированной цели выполнен весь блок поставленных автором задач.

- Разработаны и оформлены в виде ру-файлов макеты экранных форм для всех служебных файлов с расчетными параметрами.

- Разработан, перенесен на программный код и внедрен в приложение механизм передачи введенных пользователем параметров из форм в соответствующие служебные файлы расчетного случая.

- Для элементов управления экранных форм добавлены валидаторы, контролирующие правильность типов данных вводимых параметров.

- Создан и перенесен на программный код механизм проверки структуры расчетного

случая на наличие необходимых служебных файлов перед запуском решателя.

- Реализован механизм взаимосвязи графического и программного компонентов для каждой экранной формы. Механизм перенесен на программный код и интегрирован с базовой версией графической оболочки.

- Подготовлен и подключен к базовой версии приложения механизм обеспечения вариативности служебных файлов для одного расчетного случая.

Созданный автором продукт показал применимость выбранного стека, главным образом, языка программирования Python и библиотеки PyQt для разработки настольных программных решений с графическим интерфейсом. Предполагается проведение дальнейших исследований по данной тематике и расширение перечня опций графической оболочки для обеспечения доступа специалиста к другим утилитам пре- и постпроцессинга, а также к новым решателям OpenFOAM, прежде всего в области гидро- и газовой динамики.

Литература

1. OpenFOAM. The open source CFD toolbox. URL: <https://www.openfoam.com> (дата обращения: 24.11.2023).
2. Salome. The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation. URL: <http://www.salome-platform.org/> (дата обращения: 24.11.2023).
3. Helyx-OS. Open-source GUI for OpenFOAM. URL: <http://engys.com/products/helyx-os> (дата обращения: 24.11.2023).
4. Visual-CFD. CFD simulation software aimed at solving complex flow applications. URL: <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-environment/cfd-multiphysics/visual-cfd-openfoam> (дата обращения: 24.11.2023).
5. Ченцов П.А. Об одном подходе к построению интерфейсов консольных приложений: технология TextControlPages // Программная инженерия. 2016. №12. С. 539-546.
6. Пашенко Д.С. Отражение в российской практике мировых тенденций в технологиях, средствах и подходах в разработке программного обеспечения // Программная инженерия. 2017. №8. С. 339-344.
7. Читалов Д.И. и др. Разработка графического интерфейса пользователя для программного комплекса OpenFOAM // Программная инженерия. 2016. Т. 7. № 12. С. 568-574.
8. Читалов Д.И. Разработка модуля для решателя rogofoam и его интеграция в openfoam // Информационные технологии и вычислительные системы. 2023. №3. С. 93-101.
9. Читалов Д.И. Разработка модуля для работы с решателем plasticstressedfoam на базе пакета openfoam // Системы и средства информатики. 2023. Т. 33. №12. С. 111-123.
10. Читалов Д.И. О разработке модуля для решателя coupledrogofoam пакета openfoam // Программная инженерия. 2023. Т. 14. №2. С. 93-100.
11. ParaView. URL: <https://www.paraview.org/> (дата обращения: 24.11.2023).
12. Аминев Б.Д. и др. Использование пакета openfoam для исследования шумовых характеристик морского подводного объекта // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1. С. 41-49.
13. Brennan D. The Numerical Simulation of Two Phase Flows in Settling Tanks. University of London; 2001. 512 p.
14. PyQt5 Reference Guide. URL: <http://pyqt.sourceforge.net/Docs/PyQt5/> (дата обращения: 04.11.2022).
15. Python 3.7 documentation. URL: <https://devdocs.io/python~3.7/> (дата обращения: 24.11.2023).
16. SQLite. URL: <https://www.sqlite.org/index.html> (дата обращения: 24.11.2023).
17. PyCharm. IDE для профессиональной разработки на Python. URL: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/pycharm/> (дата обращения: 24.11.2023).
18. OpenFOAM_GUI. URL: https://github.com/DmitryChitalov/OpenFOAM_GUI (дата обращения: 24.11.2023).
19. АО ГРЦ им. Макеева. URL: <http://www.makeyev.ru/> (дата обращения: 24.11.2023).

Читалов Дмитрий Иванович. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского отделения Российской академии наук, Россия, Челябинская обл., г. Миасс, Ильменский заповедник. Младший научный сотрудник. Область научных интересов: информационные технологии, программирование, численное моделирование. E-mail: cdi9@yandex.ru

Development of Simulation Controls Based on the Driftfluxfoam Solver of the OpenFOAM Platform

D. I. Chitalov

South Urals Federal Research Centre of Mineralogy and Geoecology of the UB RAS, Chelyabinsk region, Miass, Ilmen reserve, Russia

Abstract. The paper covers the issues of expanding the capabilities of the graphical shell for the OpenFOAM software package by connecting a module for controlling numerical modeling in the field of continuum mechanics using the driftFluxFoam solver program. Existing approaches to solving the problem of the lack of a graphical user interface for OpenFOAM are analyzed, their shortcomings are identified, and the relevance of the ongoing research is proven. The main components of the paper are highlighted: research topic, goals and objectives, results, novelty of the work and expected practical value. The technology stack by means of which the research goal is achieved is presented and argued, the features and advantages of each technology are highlighted. A diagram is provided showing the step-by-step process of a user working with the product. The stages of conducting a numerical experiment using the proposed graphical shell and the driftFluxFoam solver are described. The key techniques proposed by the author and distinguishing the current product from its closest analogues are highlighted. The possibility of using the selected stack to achieve development goals was confirmed, and the main directions for further research in the topic under consideration were formulated.

Keywords: numerical simulation, continuum mechanics, graphical user interface, OpenFOAM, driftFluxFoam solver.

DOI 10.14357/20718632240211

EDN ZOITZE

References

1. OpenFOAM. The open source CFD toolbox. Available from: <https://www.openfoam.com> (Accessed 24 November 2023).
2. Salome. The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation. Available from: <http://www.salome-platform.org/> (Accessed 24 November 2023).
3. Helyx-OS. Open-source GUI for OpenFOAM. Available from: <http://engys.com/products/helyx-os> (Accessed 24 November 2023).
4. Visual-CFD. CFD simulation software aimed at solving complex flow applications. Available from: <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-environment/cfd-multiphysics/visual-cfd-openfoam> (Accessed 24 November 2023).
5. Chentsov P.A. On one approach to building interfaces for console applications: the TextControlPages technology. *Software engineering journal*. 2016; 12:539-546 (In Russ). doi: 10.17587/prin.7.539-546.
6. Pashchenko D.S. Reflection in Russian practice of world trends in technologies, tools and approaches in software development. *Software engineering journal*. 2017; 8:339-344 (In Russ). doi: 10.17587/prin.8.339-344.
7. Chitalov D.I., Merkulov E.S., Kalashnikov S.T. Development of a Graphical User Interface for the OpenFOAM Toolbox. *Software engineering journal*. 2016; 12:568-574 (In Russ). doi: 10.17587/prin.7.568-574.
8. Chitalov D.I. Development of a module for the poroplasticstressedfoam solver and its integration into openfoam. *Information technology and computing systems*. 2023; 3: 93-101 (In Russ). doi: 10.14357/20718632210206.
9. Chitalov D.I. Development of a module for working with the plasticstressedfoam solver based on the openfoam package. *Systems and Means of Informatics scientific journal*. 2023; 12:111-123 (In Russ). doi: 10.14357/08696527230211.
10. Chitalov D.I. About the development of a module for the coupledporofoam solver of the openfoam package. *Software engineering journal*. 2023; 2:93-100 (In Russ). doi: 10.17587/prin.14.93-100.
11. ParaView. Available from: <https://www.paraview.org/> (Accessed 24 November 2023).
12. Aminev B.D., Danilova S.K. Using the openfoam package to study the noise characteristics of a marine underwater object. 2015; 1:41-49 (In Russ).
13. Brennan D. *The Numerical Simulation of Two Phase Flows in Settling Tanks*. University of London; 2001. 512 p.
14. PyQt5 Reference Guide. Available from: <http://pyqt.sourceforge.net/Docs/PyQt5/> (Accessed 24 November 2023).
15. Python 3.7 documentation. Available from: <https://devdocs.io/python~3.7/> (Accessed 24 November 2023).

-
16. SQLite. Available from: <https://www.sqlite.org/index.html> (Accessed 24 November 2023).
 17. PyCharm. Available from: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/pycharm/> (Accessed 24 November 2023).
 18. OpenFOAM_GUI. Available from: https://github.com/DmitryChitalov/OpenFOAM_GUI (Accessed 24 November 2023).
 19. JSC GRTs im. Makeeva. Available from: <http://www.makeyev.ru/> (Accessed 24 November 2023).

Chitalov Dmitry I. Junior Researcher, South Urals Federal Research Centre of Mineralogy and Geoecology of the UB RAS, Russia, Chelyabinsk region, 456317, Miass, Ilmen reserve. E-mail: cdi9@yandex.ru