

Разработка модуля для решателя poroPlasticStressedFoam и его интеграция в OpenFOAM

Д. И. Читалов

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

Аннотация. В статье рассматривается проблема доработки базовой версии графической оболочки платформы OpenFOAM для проведения численных экспериментов в области механики сплошных сред. Поставлена цель разработать и интегрировать в базовую версию приложения программный модуль для управления численным моделированием посредством решателя poroPlasticStressedFoam. Для достижения поставленной цели построена UML-диаграмма, описывающая механизм работы модуля, подготовлен программный код, обеспечивающий отображение графической части модуля и логику его работы. Представлен стек технологий, необходимый для выполнения поставленных задач разработки, а также требования к вычислительному устройству. В статье раскрываются результаты проведенной работы на примере одной из фундаментальных задач механики сплошных сред, моделируемых на базе платформы OpenFOAM. Практическая ценность выполненной разработки выражается в минимизации рабочего времени, затрачиваемого специалистами на этапы пре- и пост-процессинга моделирования задач механики сплошных сред.

Ключевые слова: численное моделирование, механика сплошных сред, графический интерфейс пользователя, OpenFOAM, открытое программное обеспечение, решатель poroPlasticStressedFoam.

DOI 10.14357/20718632230310

Введение

Работа содержит описание результатов по расширению перечня опций оконного интерфейса пользователя платформы OpenFOAM [1]. Это интегрируемая программная среда с открытым исходным кодом под управлением операционной системы Linux, применяемая для гидродинамических, прочностных расчетов, решения задач горения и других задач механики сплошных сред (МСС).

Процесс численного моделирования на базе OpenFOAM предусматривает создание директории расчетного случая и наполнение ее файлами, контролирующими параметры расчетной

сетки, параметры численной модели и т.д. Далее специалист выполняет генерацию расчетной сетки посредством одной из встроенных утилит, визуализирует полученный результат с помощью приложения ParaView [2] и переходит к расчетной части эксперимента. Она предполагает запуск соответствующего решателя. Полученная численная модель может быть скорректирована путем внесения изменений в соответствующие конфигурационные файлы расчетного случая и повторного запуска служебных утилит и решателя. Проблема представленного подхода заключается в том, что указанные шаги осуществляются вручную. Это отнимает

значительный объем рабочего времени специалистов, повышает риск сохранения некорректных расчетных параметров и, как итог, получения неверной численной модели задачи МСС.

Модульный принцип устройства платформы OpenFOAM позволил международным коллективам разработчиков реализовать собственные продукты, выполняющие роль графических интерфейсов, например, Salome [3], Helyx-OS [4], Visual-CFD [5]. Некоторые из них доступны только после оплаты лицензии и характеризуются сложностью в установке, настройке и применении, поэтому требуют приобретения услуг технической поддержки. Отечественные разработчики также проявляют интерес к описываемой проблеме [6-7], представляя свои пути ее решения. Автором предложена оригинальная идея по решению проблемы отсутствия графической оболочки для OpenFOAM, воплощенная в виде собственной версии графического интерфейса [8]. Он расширяет исходный код OpenFOAM и также реализован по модульному принципу, значит может дополняться компонентами для выполнения задач в рамках пре- и постпроцессинга, а также расчета.

Поскольку компания-разработчик продолжает пополнять дистрибутив OpenFOAM новыми утилитами и программами-решателями, то имеет важность и вопрос актуализации реализованной автором базовой версии графической оболочки. Актуализация выражается в разработке и подключении дополнительных программных модулей. Работа над решением данной проблемы ведется с 2017 г., и в настоящее время базовая версия интерфейса расширена за счет нескольких компонентов [9-12]. Для каждого из них реализована графическая (экранная форма и элементы управления форм) и программная (алгоритмы, перенесенные на язык программирования) составляющие.

Базовая версия графического интерфейса для OpenFOAM [8], как и реализованный блок дополнительных модулей [9-12], применимы к большинству отраслей промышленности, прежде всего к автомобилестроению, морским исследованиям, аэрокосмическому строению и другим отраслям. Работоспособность дополненной версии графической оболочки протестирована в рамках численного моделирования задач

аэрокосмического строения на предприятии АО ГРЦ им. Макеева [13].

За счет переноса ряда этапов численного эксперимента на программную оболочку пользователь получает возможность определения расчетных параметров задач МСС через привычные экранные формы, а директория расчетного случая и служебные файлы с параметрами будут также создаваться программными средствами. Модуль для работы с решателем `poroPlasticStressedFoam` также предусматривает опцию запуска сторонних приложений, в частности, ParaView, для анализа результатов, т.е. оценки степени соответствия построенной численной модели реальному объекту или процессу. С помощью предложенного модуля специалист имеет возможность выполнить не только численное моделирование задачи МСС средствами решателя `poroPlasticStressedFoam`, но и подготовить расчетную сетку с помощью одной из базовых утилит OpenFOAM или подключить сетку, сгенерированную на базе сторонних программных комплексов.

1. Назначение программы-решателя `poroPlasticStressedFoam`

Компания OpenCFD, разработчик OpenFOAM, стремится к расширению опций платформы, т.е. к расширению списка доступных утилит для пре- и постпроцессинга и доступных программ-решателей для расчетов по большому перечню задач МСС. Решатель `poroPlasticStressedFoam` доступен в OpenFOAM начиная с версии 1.6 и предназначен для исследования характеристик напряжения в пористых твердых телах, например, при изучении свойств почвы в геотехнической инженерии. Также программа `poroPlasticStressedFoam` может применяться в численных экспериментах в области гидродинамики для пористых тел при их взаимодействии с окружающей средой, в области теплоэнергетики, теплопереноса в пористых средах, турбулентности. В этот перечень входят и более специфические задачи, например, моделирование гидродинамики с учетом неподвижной пористой вставки, моделирование двухфазного течения в канале.

Особое внимание отводится теплоэнергетике, где идет речь об использовании пористых

материалов, а значит требуется проведение экспериментов, раскрывающих изменение характеристик этих материалов под влиянием внешних условий среды. Что касается расчетных сеток, то зачастую достаточно блочной сетки, которая генерируется средствами стандартной утилиты blockMesh.

Если говорить о математической сущности моделируемой задачи, то в основе решателя poroPlasticStressedFoam лежат алгоритмы для решения уравнений импульса, потока воды в порах. При этом специалист может помимо стандартных физических параметров, в частности, величины давления, определить для моделируемой задачи МСС и другие параметры, например, допуски сходимости.

2. Постановка цели и задач

Цель настоящей публикации выражается в разработке программного модуля для решателя poroPlasticStressedFoam и его интеграции в базовую версию графической оболочки платформы OpenFOAM. Выполнение поставленной цели предусматривает изучение документации для OpenFOAM и учебных задач МСС, входящих в стандартный дистрибутив платформы [14-15]. Проектирование модуля включает определение его структуры, а также подготовку блок-схемы, описывающей логику работы.

К задачам относятся сформулированные далее шаги, необходимые для достижения цели.

1. С помощью графического редактора и языка UML построить блок-схему логики работы модуля.

2. С помощью выбранного языка программирования подготовить исходный код, обеспечивающий формирование и отображение экраных форм для каждого из служебных файлов расчетного случая, а также код, обеспечивающий передачу параметров из форм в соответствующие служебные файлы расчетного случая.

3. Реализовать возможность программного запуска как служебных утилит OpenFOAM, так и решателя poroPlasticStressedFoam.

4. Реализовать механизм программной защиты от неверных действий пользователя на этапах пре- и постпроцессинга, а также решения задачи МСС. Механизм должен обеспечивать защиту от ввода некорректных параметров и

проверку комплектности расчетного случая перед запуском моделирования и визуализации результатов средствами пакета ParaView.

3. Средства разработки

Под инструментальными средствами подразумеваются программные решения с графическим интерфейсом, обеспечивающие выполнение каждого этапа разработки приложения от проектирования до подготовки исходного кода, его отладки, рефакторинга и создания тестов. Это и интерпретаторы, и СУБД, и интегрированные среды разработки, и другие необходимые программные решения. Выбор каждого из них представляет собой серьезную задачу, т.к. от этого зависит скорость, трудоемкость, потенциальные финансовые затраты и т.д. Проанализировав перечисленные факторы, автор принял решение выбрать приведенный далее стек технологий.

- 1) Инструмент для создания блок-схемы. Она будет создаваться с помощью онлайн-сервиса draw.io [16], не требующего установки и приобретения лицензии. Работа в нем осуществляется через веб-интерфейс.

- 2) Инструмент для реализации логики. Кроссплатформенность, интуитивно понятный синтаксис и большой перечень встроенных классов делают язык программирования Python одним из наиболее эффективных по качеству и скорости разработки для программирования логики приложений [17].

- 3) Инструмент для реализации графического интерфейса. Библиотека PyQt5 для языка программирования Python включает весь перечень необходимых классов-виджетов, из которых разработчик формирует интерфейс программы [18].

- 4) Инструмент для реализации подсистемы хранения данных. Это СУБД для хранения расчетных параметров задачи для обеспечения возможности их последующего редактирования. Применительно к настольным программным продуктам оптимальным вариантом служит СУБД SQLite, т.к. она предусматривает привычное файловое хранение данных и не требует дополнительных настроек [19].

- 5) Интегрированная среда разработки. Несмотря на многообразие готовых решений для

набора, отладки, тестирования Python-кода, например, VSCode, Notepad и др., среди разработчиков большой популярностью пользуется продукт от компании JetBrains под названием PyCharm. Он обладает графическим интерфейсом и позволяет осуществлять все этапы работы с исходным кодом на Python [20].

Приведенные технологии соответствуют ключевому принципу разработки – предоставление их на основе открытого доступа. Это означает, что отсутствуют какие-либо требования по приобретению лицензии. Для среды разработки PyCharm предусмотрена более функциональная коммерческая версия.

4. Логика работы модуля

Дистрибутив OpenFOAM содержит исполняемые файлы для моделирования большинства типов задач МСС. Это программы-решатели, отвечающие за расчетную часть эксперимента. В список таких программ-решателей входит и

poroPlasticStressedFoam. Алгоритм работы с представленным в статье модулем включает несколько шагов для управления расчетным экспериментом. На первом шаге специалист создает директорию расчетного случая. Для каждого типа задач МСС характерна определенная структура этой директории. В ней создаются файлы с расчетными параметрами и управляющие файлы, контролирующие ход численного эксперимента. Благодаря рассматриваемому модулю пользователь заменяет подход ручного создания перечисленных файлов на программное создание, т.е. за все отвечают алгоритмы модуля. Также специалисту доступна опция выбора одного из существующих расчетных случаев, а не только создания нового.

Директория расчетного случая включает набор служебных файлов с параметрами расчетной сетки, файлов, контролирующих физические параметры модели, файлов с параметрами дискретизации системы уравнений, а также файлов с параметрами скорости, давления и

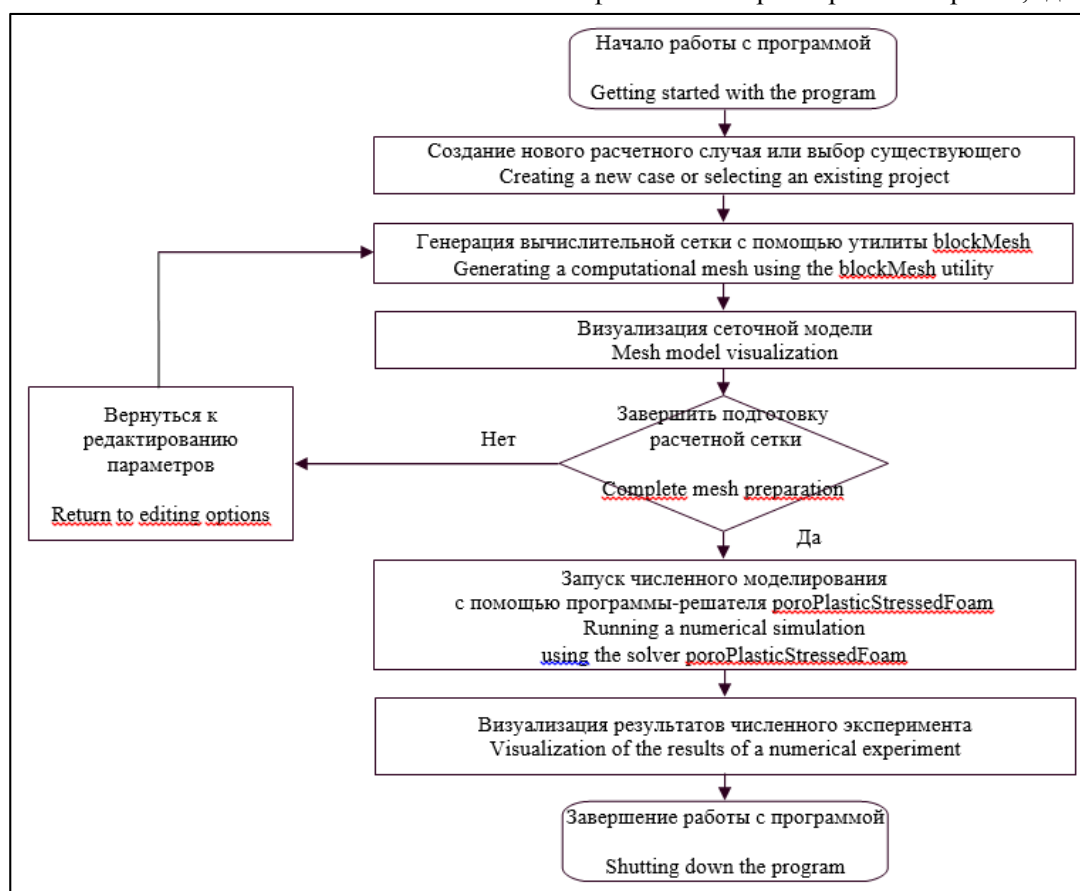


Рис. 1. Блок-схема взаимодействия пользователя с модулем poroPlasticStressedFoam платформы OpenFOAM

описанием граничных условий. Указанные файлы создаются на этапе препроцессинга в рамках которого производится настройка расчетной области. Для генерации сетки, как уже говорилось ранее, может быть применена одна из базовых утилит, например, `blockMesh`, если необходима блочная структура. Далее выполняется переход непосредственно к шагу запуска задачи на расчет с помощью решателя `poroPlasticStressedFoam`.

Продолжительность расчетной части эксперимента определяется типом задачи МСС, а также вычислительными ресурсами, которыми располагает специалист. Для отдельных ситуаций расчет может занимать несколько дней. Поэтому пользователю рекомендуется обеспечить подбор устройства с достаточными вычислительными мощностями. Стоит уделить внимание возможностям процессора и доступному объему оперативной памяти.

На любом этапе численного эксперимента специалист может отследить степень соответствия численной модели реальному процессу. Это позволяет в любой момент скорректировать параметры эксперимента, добиться наибольшей точности итогового решения. Кроме того, специалист при необходимости способен полностью поменять тип расчетной сетки, сгенерировав ее с помощью другой утилиты OpenFOAM, или подключить расчетную сетку, созданную на базе стороннего пакета.

5. Результаты

Автор выполнил расширение исходного кода базовой версии графического интерфейса для OpenFOAM. За счет дополнительного программного модуля специалисту предоставлены графические и программные средства для управления численным моделированием на базе решателя `poroPlasticStressedFoam`. Исходный код базовой версии графической оболочки обновлен и загружен на сервис GitHub [21].

Графический интерфейс для OpenFOAM является незаменимым инструментом, связывающим специалиста с программой. От пользователя не требуется запоминать сложные команды для управления утилитами и решателями, поскольку вся работа осуществляется посредством визуальных компонентов. Освоение принципов

работы с оконным интерфейсом занимает значительно меньше времени по сравнению с освоением подхода, предполагающего применение командной строки.

Доработанная версия графической оболочки находится в стадии тестирования для выявления потенциальных ошибок как в графической, так и в программной составляющих. По итогам тестирования предполагается рефакторинг кода.

На Рис. 2. приведено изображение главного окна графической оболочки платформы OpenFOAM на этапе завершения численного эксперимента и постпроцессинга результата. Приведенная численная модель иллюстрирует процесс накопления порового давления. Для построения данной модели применен решатель `poroPlasticStressedFoam`.

6. Реализованные подходы

В рамках работы над поставленными задачами автором предложены и реализованы средствами языка программирования Python следующие подходы.

1. Сериализация параметров расчетной модели. Подразумевает сохранение параметров задачи МСС для обеспечения возможности последующего их восстановления и корректировки. Сериализация осуществляется путем трансформации любого Python-объекта в формат, оптимально подходящий для хранения и передачи этого объекта. В приложениях на базе языка программирования Python таким форматом является JSON. Одноименный модуль библиотеки Python предусматривает встроенные методы как для сохранения (сериализации), так и для распаковки объектов (десериализации). Указываемые пользователем расчетные параметры записываются в массивы. Для их хранения выделяется значительный объем оперативной памяти. За счет сериализации методами модуля JSON массивы конвертируются в строковый формат. JSON-строки требуют минимального объема оперативной памяти и при необходимости могут быть трансформированы обратно в Python-массивы для редактирования и затем вновь подвергнуты сериализации.

2. Валидация параметров расчетного случая. Обеспечивается благодаря стандартным классам-валидаторам библиотеки PyQt5, а также

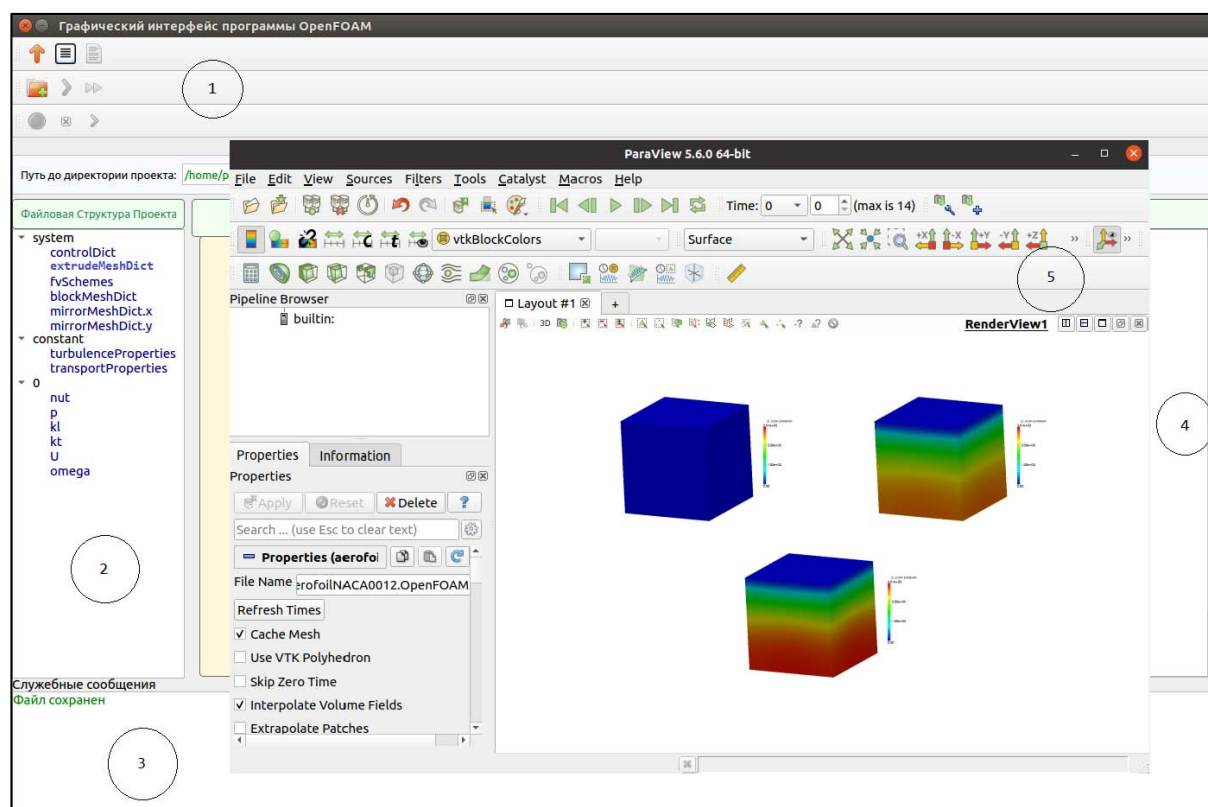


Рис. 2. Главное окно интерфейса OpenFOAM

- 1 – панель управления численным экспериментом, 2 – дерево (структура) расчетного случая,
3 – строка состояния, 4 – панель ввода параметров задачи MCC, 5 – окно пакета ParaView

блокам ветвления, реализуемым средствами языка программирования Python. Классы-валидаторы позволяют осуществлять проверку по типу вводимых данных, а также задавать параметры по заранее определенному шаблону.

3. Обеспечение вариативности служебных файлов. Для каждого расчетного случая специалист может сформировать несколько версий конфигурационных файлов с параметрами численной модели для различных условий среды. Механизм предполагает сохранение набора конфигурационных файлов с параметрами конкретной задачи MCC в отдельной директории. При необходимости редактирования параметров задачи MCC специалист выбирает директорию соответствующего расчетного случая, выполняет корректировку параметров и запускает расчет. Каждая директория с конфигурационными файлами соответствует определенному расчетному случаю. Для любого расчетного случая пользователь может создать несколько таких директо-

рий, в каждой из которых создать конфигурационные файлы для различных граничных условий и параметров сеточных моделей.

В подходе, реализованном отечественными разработчиками [6], оконный графический интерфейс полностью отсутствует, а управление численным экспериментом, в том числе подготовку служебных файлов, запуск программы-решателя, визуализацию результатов пользователь осуществляет посредством специального разработанного консольного менеджера, созданного на базе библиотеки TextControlPages. По сути это модифицированный традиционный подход, где главная роль по-прежнему отводится командной строке, а ценность выражается в том, что ряд шагов пре- и постпроцессинга, а также решения переведены с ручного на программное выполнение. А значит существенного повышения удобства специалиста и производительности при проведении численных исследований добиться при этом подходе сложно.

Кроме того, авторами не предусмотрена сериализация расчетных параметров, а значит отсутствует возможность подготовки для одного расчетного случая нескольких вариантов служебных файлов с расчетными параметрами.

Заключение

Подводя итоги работы, можно сделать вывод, что поставленная цель достигнута. Автором с помощью встроенного дизайнера библиотеки PyQt созданы макеты экранных форм для определения расчетных параметров задачи МСС. Реализована связка программного кода экранных форм и кода алгоритмов, обеспечивающих формирование служебных файлов расчетного случая, а также их редактирование. Сформулированы и перенесены на программный код алгоритмы, обеспечивающие запуск утилит OpenFOAM и программы-решателя poroPlasticStressedFoam. В рамках работы над достижением поставленной цели выполнены все поставленные автором задачи.

1. С помощью онлайн-сервиса draw.io построена блок-схема, описывающая логику работы модуля, включая этапы пре- и постпроцессинга, а также решения задачи МСС с помощью решателя poroPlasticStressedFoam.

2. За счет команд языка программирования Python и библиотеки PyQt подготовлен программный код, обеспечивающий визуализацию графической составляющей и работу программной части приложения.

3. Подготовлен скрипт, обеспечивающий запуск решателя poroPlasticStressedFoam через графическую оболочку.

4. Реализован механизм защиты программы от неверных действий пользователя в рамках численного моделирования. Защита от ввода некорректных расчетных параметров обеспечивается за счет классов-валидаторов библиотеки PyQt. Валидаторы привязаны к элементам управления экранных форм графической оболочки. В приложении также предусмотрена проверка наличия необходимых служебных файлов расчетного случая перед каждым этапом численного моделирования. Эта проверка обеспечивается путем рекурсивного обхода содержимого директории расчетного случая и применения условных операторов языка Python.

Говоря о перспективах дальнейшей работы в указанном направлении, можно отметить, что предложенный модульный подход оптимален для расширения возможностей графической оболочки OpenFOAM путем разработки и интеграции новых программных компонентов, упрощающих другие шаги пре- и постпроцессинга, а также предоставляющих специалисту возможность работы с другими решателями OpenFOAM.

Представленные в настоящей статье результаты обладают прежде всего практической значимостью. Итоги тестирования модуля специалистами АО ГРЦ им. Макеева показали, что в сравнении с традиционным подходом, предполагающим использование командной строки, представленный модуль обеспечивает снижение временных затрат на постановку численных экспериментов, повышает удобство пользователя благодаря наличию графического интерфейса, защищает от передачи некорректных расчетных параметров.

Литература

1. OpenFOAM. The open source CFD toolbox. URL: <https://www.openfoam.com> (дата обращения: 04.11.2022).
2. ParaView. URL: <https://www.paraview.org/> (дата обращения: 04.11.2022).
3. Salome. The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation. URL: <http://www.salome-platform.org/> (дата обращения: 04.11.2022).
4. Helyx-OS. Open-source GUI for OpenFOAM. URL: <http://engys.com/products/helyx-os> (дата обращения: 04.11.2022).
5. 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: 04.11.2022).
6. Ченцов П.А. Об одном подходе к построению интерфейсов консольных приложений: технология TextControlPages // Программная инженерия. 2016. №12. С. 539-546.
7. 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.
8. Читалов Д.И. и др. Разработка графического интерфейса пользователя для программного комплекса OpenFOAM // Программная инженерия. 2016. Т. 7. № 12. С. 568-574.
9. Читалов Д.И. и др. Разработка модуля для реализации зеркального отображения расчетных сеток вокруг за-

- данной плоскости в графическом интерфейсе пользователя платформы openfoam // Программная инженерия. 2019. Т. 10. №7-8. С. 297-304.
10. Читалов Д.И. О разработке модуля для реализации движения и топологического изменения расчетных сеток и его интеграции в графическую оболочку для платформы openfoam // Программная инженерия. 2020. Т. 11. №2. С. 108-114.
 11. Читалов Д.И. Разработка модуля для измельчения ячеек расчетных сеток в нескольких направлениях и его интеграция в gui для программной среды openfoam // Системы и средства информатики. 2020. Т. 30. №3. С. 133-144.
 12. Читалов Д.И. Разработка модуля для формирования перегородок в расчетных сетках при постановке численных экспериментов с помощью графического интерфейса пользователя платформы openfoam // Прикладная информатика. 2020. Т. 15. №4(88). С. 75-86.
 13. АО ГРЦ им. Макеева. URL: <http://www.makeyev.ru/> (дата обращения: 04.11.2022).
 14. OpenFOAM. User Guide. URL: <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf> (дата обращения: 04.11.2022).
 15. OpenFOAM. Tutorial Guide. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/tutorial-guide/index.php> (дата обращения: 04.11.2022).
 16. Flowchart Maker and Online Diagram Software. URL: <https://draw.io/> (дата обращения: 04.11.2022).
 17. Python 3.7 documentation. URL: <https://devdocs.io/python~3.7/> (дата обращения: 04.11.2022).
 18. PyQt5 Reference Guide. URL: <http://pyqt.sourceforge.net/Docs/PyQt5/> (дата обращения: 04.11.2022).
 19. SQLite. URL: <https://www.sqlite.org/index.html> (дата обращения: 04.11.2022).
 20. PyCharm. IDE для профессиональной разработки на Python. URL: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/pycharm/> (дата обращения: 04.11.2022).
 21. OpenFOAM_GUI. URL: https://github.com/DmitryChitalov/OpenFOAM_GUI (дата обращения: 04.11.2022).

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

Development of a Module for the poroPlasticStressedFoam Solver and its Integration into OpenFOAM

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 deals with the problem of finalizing the basic version of the graphical shell of the OpenFOAM platform for conducting numerical experiments in the field of continuum mechanics. The goal was to develop and integrate into the basic version of the application a software module for managing numerical simulation using the poroPlasticStressedFoam solver. To achieve this goal, a UML diagram has been constructed that describes the mechanism of the module operation, a program code has been prepared that provides display of the graphical part of the module and the logic of its operation. The stack of technologies necessary to fulfill the set development tasks, as well as the requirements for a computing device, are presented. The paper reveals the results of the work carried out on the example of one of the fundamental problems of continuum mechanics, modeled on the basis of the OpenFOAM platform. The presented module was created for the needs of the design department of JSC GRC im. Makeev, focused on the production of aerospace products, but can be used at enterprises in other industry segments. The practical value of the completed development is expressed in minimizing the working time spent by specialists on the stages of pre- and post-processing of modeling problems in continuum mechanics.

Keywords: numerical simulation, continuum mechanics, graphical user interface, OpenFOAM, open source software, poroPlasticStressedFoam solver.

DOI 10.14357/20718632230310

References

1. OpenFOAM. The open source CFD toolbox. Available at: <https://www.openfoam.com> (accessed November 04, 2022).
2. ParaView. Available at: <https://www.paraview.org/> (accessed November 04, 2022).
3. Salome. The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation. Available at: <http://www.salome-platform.org/> (accessed November 04, 2022).
4. Helyx-OS. Open-source GUI for OpenFOAM. Available at: <http://engys.com/products/helyx-os> (accessed November 04, 2022).
5. Visual-CFD. CFD simulation software aimed at solving complex flow applications. Available at: <https://www.esi-group.com/software-solutions/virtual-environment/cfd-multiphysics/visual-cfd-openfoam> (accessed November 04, 2022).
6. Chentsov, P.A. 2016. Ob odnom podhode k postroeniyu interfejsov konsol'nyh prilozhenij: tekhnologiya TextControlPages [On one approach to building interfaces for console applications: the TextControlPages technology]. Programmnaya inzheneriya [Software engineering journal] 12:539-546.
7. Pashchenko, D.S. 2017. Otrazhenie v rossijskoj praktike mirovyh tendencij v tekhnologiyah, sredstvah i podhodah v razrabotke programmnogo obespecheniya [Reflection in Russian practice of world trends in technologies, tools and approaches in software development]. Programmnaya inzheneriya [Software engineering journal] 8:339-344.
8. Chitalov, D.I., E.S. Merkulov, and S.T. Kalashnikov. 2016. Razrabotka graficheskogo interfejsa pol'zovatelya dlya programmnogo kompleksa OpenFOAM [Development of a Graphical User Interface for the OpenFOAM Toolbox]. Programmnaya inzheneriya [Software engineering journal] 12:568-574.
9. Chitalov, D.I. 2019. Razrabotka modulya dlya realizacii zerkal'nogo otobrazheniya raschetnyh setok vokrug zadanoj ploskosti v graficheskom interfejse pol'zovatelya platformy openfoam [Development of a module for the implementation of mirroring of computational meshes around a given plane in the graphical user interface of the openfoam platform]. Programmnaya inzheneriya [Software engineering journal] 7-8:297-304.
10. Chitalov, D.I. 2020. O razrabotke modulya dlya realizacii dvizheniya i topologicheskogo izmeneniya raschetnyh setok i ego integracii v graficheskuyu obolochku dlya platformy openfoam [About the development of a module for the implementation of motion and topological changes in computational meshes and its integration into the graphical shell for the openfoam platform]. Programmnaya inzheneriya [Software engineering journal] 2:108-114.
11. Chitalov, D.I. 2020. Razrabotka modulya dlya izmel'cheniya yacheek raschetnyh setok v neskol'kih napravleniyah i ego integraciya v gui dlya programmoj sredy openfoam [Development of a module for grinding cells of computational meshes in several directions and its integration into gui for the openfoam software environment]. Sistemy i sredstva informatiki [Systems and Means of Informatics scientific journal] 3:133-144.
12. Chitalov, D.I. 2020. Razrabotka modulya dlya formirovaniya peregorodok v raschetnyh setkah pri postanovke chislennyh eksperimentov s pomoshch'yu graficheskogo interfejsa pol'zovatelya platformy openfoam [Development of a module for the formation of partitions in computational meshes when setting up numerical experiments using the graphical user interface of the openfoam platform]. Prikladnaya informatika [Journal of Applied Informatics] 4:75-86.
13. JSC GRTs im. Makeeva. Available at: <http://www.makeyev.ru/> (accessed November 04, 2022).
14. OpenFOAM. User Guide. Available at: <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf> (accessed November 04, 2022).
15. OpenFOAM. Tutorial Guide. Available at: <https://www.openfoam.com/documentation/tutorial-guide/index.php> (accessed November 04, 2022).
16. Flowchart Maker and Online Diagram Software. Available at: <https://draw.io/> (accessed November 04, 2022).
17. Python 3.7 documentation. Available at: <https://dev-docs.io/python-3.7/> (November 04, 2022).
18. PyQt5 Reference Guide. Available at: <http://pyqt.sourceforge.net/Docs/PyQt5/> (accessed November 04, 2022).
19. SQLite. Available at: <https://www.sqlite.org/index.html> (accessed November 04, 2022).
20. PyCharm. Available at: <https://www.jetbrains.com/ru-ru/pycharm/> (accessed November 04, 2022).
21. OpenFOAM_GUI. Available at: https://github.com/DmitryChitalov/OpenFOAM_GUI (accessed November 04, 2022).

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