

Разработка модуля для подготовки расчетных сеток методом экструзии и его интеграция в OpenFOAM

Д. И. Читалов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского отделения РАН, Челябинская обл., г. Миасс, Россия

Аннотация. В работе приведено описание утилиты `extrudeMesh`, встроенной в OpenFOAM и обеспечивающей экструзию сеток, а также описание структуры файла-словаря `extrudeMeshDict`. Представлен стек технологий, требующийся для подготовки, отладки и тестирования программного кода модуля. Приведена блок-схема, отражающая логику работы модуля, приведены результаты его тестирования на примере одной из учебных задач механики сплошных сред, входящих в дистрибутив OpenFOAM.

Ключевые слова: численное моделирование, механика сплошных сред, графический интерфейс пользователя, OpenFOAM, открытое программное обеспечение, утилита `extrudeMesh`.

DOI 10.14357/20718632220109

Введение

Исследование, представленное в настоящей работе, посвящено интеграции в графическую оболочку программной среды (ПС) OpenFOAM [1] модуля, обеспечивающего подготовку расчетных сеток путем экструзии при выполнении численного моделирования задач механики сплошных сред. Графическая оболочка среды OpenFOAM – это свободно-распространяемое программное обеспечение для построения численных моделей в области проблем газовой динамики, жидкости и деформируемого твердого тела. OpenFOAM разработана автором для замены традиционного подхода работы с командной строкой на более привычный специалисту подход использования оконного интерфейса. Проблема отсутствия встроенной графической оболочки для OpenFOAM сохраняет актуальность, поскольку существующие программные решения

не лишены недостатков. Программный модуль позволяет через привычные экранные формы определять параметры экструзии расчетных сеток и сохранять их в файле-словаре `extrudeMeshDict` расчетного случая.

Работа над созданием графического интерфейса ведется автором с 2016 г. и на данный момент включает несколько этапов, в ходе которых подготовлена базовая версия приложения [2], дополненная рядом программных модулей, упрощающих некоторые шаги пре- и постпроцессинга численного эксперимента [3-6]. Данное исследование ориентировано на создание дополнительного модуля, предоставляющего пользователю графические и программные средства для формирования расчетных сеток (РС) методом экструзии. За выполнение этой задачи в OpenFOAM отвечает утилита `extrudeMesh`, описание которой представлено в соответствующем разделе.

Проблема отсутствия в дистрибутиве OpenFOAM встроенной графической оболочки сохраняет свою актуальность, поскольку существующие решения – Salome [7], Helyx-OS [8], Visual-CFD [9], несмотря на наличие необходимых опций, имеют слабые стороны, снижающие привлекательность этих решений для отечественного пользователя. В список недостатков перечисленных продуктов входят: необходимость приобретения лицензии, платная техническая поддержка, отсутствие русскоязычной документации. Отечественными коллективами исследователей предложены подходы к решению проблемы отсутствия графической оболочки для OpenFOAM, которые получили реализацию в виде программных решений [10] и используются специалистами некоторых предприятий.

Стандартный дистрибутив OpenFOAM, разработанный компанией OpenCFD, не предусматривает встроенных графических средств для управления численным моделированием задач МСС. Шаги эксперимента пользователь выполняет вручную, в частности: создание директории расчетного случая, подготовку необходимых файлов-словарей, содержащих параметры задачи МСС, запуск утилит пре- и постпроцессинга, запуск программ-решателей, отвечающих за генерацию численной модели задачи МСС, а также за визуализацию этой модели посредством пакета ParaView [11].

Кроме возможности управлять подготовкой расчетного случая посредством графического интерфейса, имеет актуальность вопрос валидации сохраняемых в файлах-словарях параметров, а также вопрос проверки комплектности служебных файлов в директории расчетного случая задачи МСС. Использование графического интерфейса позволяет заменить трудоемкий и сопряженный с вероятностью появления ошибок подход на более привычный, когда управление численным экспериментом осуществляется через стандартные экранные формы.

Первоначальная версия графической оболочки [2] предназначалась для специалистов АО ГРЦ им. Макеева [12], которые одними из первых на отечественном рынке протестировали возможности OpenFOAM. Но целью работы

является создание универсального интерфейса, поэтому предложенное программное решение может применяться и на других предприятиях сферы тяжелого машиностроения, в их конструкторских и технологических подразделениях. Другие отрасли, в которых возможно его применение – авиа- и ракетостроение, автомобилестроение, двигателестроение, т.е. области, где необходимо выполнять численное моделирование многокомпонентных изделий, а также изучение изменений их характеристик при взаимодействии с окружающей средой.

Представленный в статье программный модуль отвечает за управление одним из важнейших этапов численного эксперимента – подготовку РС. От результатов этого этапа зависит насколько итоговая численная модель будет соответствовать реальному процессу или объекту. В OpenFOAM существует большой перечень так называемых сеточных утилит, для работы с которыми автором реализован блок программных модулей [3-6].

Поскольку OpenFOAM является открытым продуктом, а представленная графическая оболочка расширяет его исходный код, то она также является свободно-распространяемым программным решением, не требующим приобретения лицензии. При этом, графическая оболочка сопровождается русскоязычной документацией для пользователя по ее установке, настройке и применению.

1. Назначение утилиты `extrudeMesh`

Компания-разработчик OpenFOAM стремится к расширению функциональных возможностей своего продукта, поэтому список доступных утилит для пре- и постпроцессинга, а также программ-решателей расширяется с каждым релизом. Утилита `extrudeMesh`, применяемая для формирования РС путем экструзии, доступна специалистам начиная с версии OpenFOAM 2.2.0. Особенности функционирования утилиты исследованы автором на основе руководства пользователя и блока учебных задач [13-14].

Утилита `extrudeMesh` входит в перечень стандартных утилит программного комплекса OpenFOAM, предназначенных для работы с РС. Данная утилита предназначена для реализации

3D-экструзии, т.е. выдавливания, которое обеспечивает модификацию двумерной сетки путем сворачивания грани на себя (для создания отступа), либо путем выдавливания грани наружу вдоль ее нормали поверхности – вектора направления, перпендикулярного многоугольной грани.

Экструзия – один из методов формирования трехмерных сеток на базе двумерных посредством их вытягивания в третье измерение. Полученные трехмерные сетки могут состоять из параллелепипедов, клиновидных элементов или их соединений. Формирование РС методом экструзии позволяет создавать расчетные сеточные модели без использования ассоциированной расчетной модели изделия.

В OpenFOAM экструзия осуществляется на этапе препроцессинга численного эксперимента после генерации базовой РС посредством одной из стандартных утилит. Далее с помощью утилиты extrudeMesh один из патчей подготовленной РС вытягивается на определенное расстояние. Параметры экструзии определяются в файле-словаре extrudeMeshDict. В Табл. 1 приведено описание параметров этого файла и примеры их значений.

2. Постановка цели и задач исследования

Цель описанного в данной статье исследования заключается в расширении возможностей первоначальной версии графической оболочки [2], предложенной автором для управления численными экспериментами на базе РС OpenFOAM. Речь идет о разработке модуля,

включающего графические и программные средства для подготовки файла-словаря extrudeMeshDict, содержащего параметры экструзии РС. Предложенный подход позволит реализовать для пользователя возможность управления экструзией РС через привычный оконный интерфейс. Это обеспечит снижение трудоемкости процесса подготовки РС, а также снижение вероятности допустить ошибку, достаточно высокую при существующем подходе работы через командную строку. Предложенный модуль станет звеном, которое свяжет пользователя с программными скриптами OpenFOAM, в части создания и заполнения словаря extrudeMeshDict, а также в части запуска утилиты extrudeMesh.

В список задач, необходимых для достижения поставленной цели, входят представленные ниже позиции:

1. Разработка скриптов, обеспечивающих формирование и визуализацию экранной формы для определения параметров экструзии.
2. Разработка скриптов, отвечающих за программное создание и заполнение файла-словаря extrudeMeshDict параметрами, определяемыми через экранную форму.
3. Разработка валидаторов для контроля типов данных параметров, вводимых через экранную форму.
4. Реализация возможности создания нового файла-словаря extrudeMeshDict с параметрами экструзии и редактирования существующего.
5. Реализация возможности создания нескольких вариантов файла-словаря extrudeMeshDict с различными наборами параметров экструзии для одного и того же расчетного случая.

Табл. 1. Параметры файла extrudeMeshDict

Параметр	Описание	Пример
constructFrom	Объект для экструзии (патч (patch), сетка (mesh), поверхность (surface))	constructFrom mesh;
sourcePatches	Опция используется, если необходимо выполнять экструзию из патча/сетки	sourceCase "../cavity"; sourcePatches (movingWall);
exposedPatchName	Опция используется, если необходимо выполнять экструзию из патча	exposedPatchName movingWall;
Surface	Опция используется, если необходимо выполнять экструзию из поверхности	surface "movingWall.stl";
flipNormals	Перевернуть нормали поверхности	flipNormals false;
extrudeModel	Модель экструзии	extrudeModel linearNormal;

6. Реализация возможности программного запуска генерации РС на базе утилиты `extrudeMesh`, а также визуализации результатов средствами пакета `ParaView`.

7. Интеграция программного кода модуля в исходный код базовой версии графической оболочки.

3. Средства разработки

При создании программного продукта после определения целей и задач становится актуальным вопрос о выборе технологий, на основе которых предполагается разрабатывать проект. Другими словами, это стек технологий, с помощью которых приложение обретет свой интерфейс (фронтенд), логику (бэкенд), а также систему хранения данных (СУБД). От выбора стека зависят сроки, трудоемкость и сама возможность реализации проекта. Рассматриваемый в настоящей работе программный модуль предполагается реализовать в виде настольного программного приложения, имеющего многослойную архитектуру.

- **Слой представления данных.** Это графическая составляющая программы (интерфейс, фронтенд) - «лицо проекта». Это набор элементов управления, через которые пользователь может «отдавать» команды программе, осуществлять ввод данных, в нашем случае - редактировать параметры экструзии, определяемые через экранную форму и сохраняемые в файле-словаре `extrudeMeshDict` и выполнять запуск утилиты `extrudeMesh`. Поскольку представленный программный модуль является частью уже разработанной ранее графической оболочки [2], принято решение для реализации фронтенда применить возможности библиотеки `PyQt` [15]. Она имеет статус open-source проекта, подробную документацию и многочисленное сообщество пользователей.

- **Слой логики (Бэкенд).** Этот слой представляет собой набор программных скриптов, позволяющих приложению выполнять свои задачи. Он реализуется на базе одного или нескольких языков программирования, например, `Python`, `C++`, `Java`. Автором принято решение построить логику работы рассматриваемого в статье программного модуля на базе высокоуровневого языка программирования `Python`

[16], который зарекомендовал себя эффективной технологией реализации бэкенда программных продуктов [17]. Язык стремительно набирает популярность благодаря понятному синтаксису, мощности и простоте освоения.

- **Слой хранения данных.** На практике данные, с которыми работает программа, хранятся в реляционных базах данных, например, `SQLite`, `Postgres`, `MySQL`. СУБД `SQLite` является open-source проектом. Для работы с ней в `Python` реализован модуль `sqlite3`. К преимуществам данной СУБД можно отнести отсутствие необходимости в сервере, в дополнительных настройках, экономичность и мультиплатформенность.

Помимо стека технологий в процессе подготовки к разработке программного приложения определяется среда разработки, т.е. ПО для набора исходного кода, тестирования, запуска и отладки. Для проектов, создаваемых на языке `Python`, хорошо себя зарекомендовала среда `PyCharm`.

4. Логика работы модуля

Работа с представленным в статье модулем осуществляется на этапе препроцессинга численного эксперимента, когда специалистом определяются исходные параметры моделируемой задачи МСС. На этом этапе создаются основные файлы-словари расчетного случая, в том числе и файлы-словари с параметрами сеточных моделей. За подготовкой файлов-словарей следует запуск утилиты генерации РС и визуализации созданной РС на базе пакета `ParaView`. Благодаря хранению параметров РС в файлах-словарях у пользователя сохраняется возможность в любой момент внести необходимые корректировки и запустить процесс генерации и визуализации РС повторно. Аналогичный алгоритм применяется и в случае работы с утилитой `extrudeMesh`.

После определения исходных характеристик моделируемой задачи МСС и построения РС специалист выполняет запуск соответствующей программы-решателя. Ее функция – генерация численной модели на основе исходных параметров. Этап решения задачи МСС может занимать продолжительное время в зависимости от используемых вычислительных возможностей. В ходе решения задачи `OpenFOAM` создает дополни-

тельные служебные файлы в директориях расчетного случая. По итогам решения задачи МСС специалист переходит к этапу постпроцессинга, на котором в численную модель могут вноситься корректировки и уточнения.

Полученная численная модель задачи МСС может быть проанализирована на предмет соответствия поставленным требованиям посредством пакета визуализации результатов численных экспериментов – ParaView. На Рис. 1 приведена блок-схема, отражающая логику работы с модулем.

5. Результаты исследования

Итогом проведенной автором работы является расширение исходного кода базовой версии графической оболочки для постановки численных экспериментов на базе ПС OpenFOAM. Таким образом, результат исследования заключается и в расширении исходного кода самой ПС OpenFOAM. Обновленная версия приложе-

ния доступна для тестирования и размещена на сервисе хостинга IT-проектов GitHub [18]. Разработанный программный модуль предоставляет пользователю графические средства для управления подготовкой РС путем экструзии. Специалист может с помощью привычных экранных форм создать файл-словарь с параметрами экструзии (`extrudeMeshDict`) и выполнить построение РС посредством утилиты `extrudeMesh`.

Обновленная версия приложения может применяться специалистами конструкторских и технологических подразделений машиностроительных предприятий при моделировании задач МСС на базе ПС OpenFOAM. Возможности обновленной версии приложения тестируются специалистами АО ГРЦ им. Макеева при работе над проектами в ракетно-космической области.

Благодаря наличию привычных экранных форм представленный модуль позволяет заменить сложный и трудоемкий процесс работы с командной строкой на более понятный и удобный пользователю способ работы через

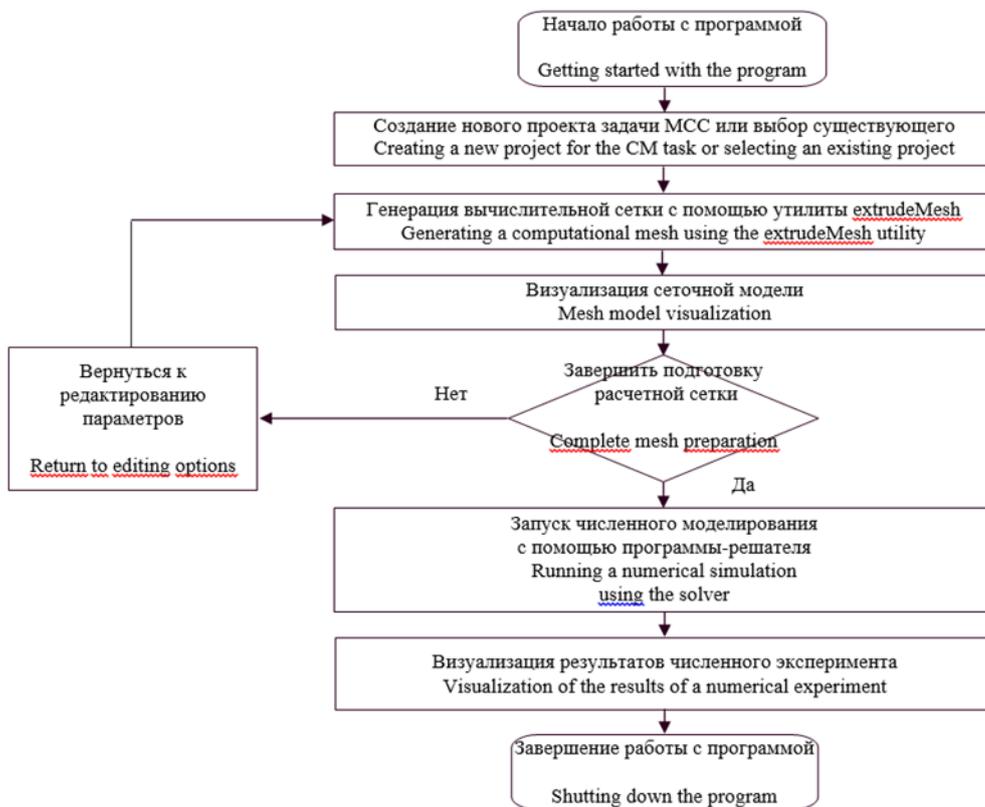


Рис. 1. Блок-схема взаимодействия пользователя с модулем для работы с утилитой `extrudeMesh` ПС OpenFOAM

графический интерфейс. Помимо возможности программного создания и заполнения файла-словаря `extrudeMeshDict` для удобства специалиста в приложении реализованы валидаторы, контролирующие корректность определяемых в файле-словаре `extrudeMeshDict` параметров. Кроме того, в приложении реализован механизм проверки комплектности файлов-словарей расчетного случая перед каждым этапом численного эксперимента.

Модифицированная версия графической оболочки (с интегрированным кодом созданного программного модуля) в настоящее время тестируется для оценки возможности полноценного использования при проведении численных исследований. На основе результатов тестирования и выявления недостатков предполагается проведение рефакторинга исходного кода приложения, а также модификация графической составляющей приложения для повышения удобства пользователей.

На Рис. 2 представлено главное окно обновленной версии приложения на этапе визуализации результатов численного эксперимента, выполненного на примере одной из учебных задач, входящих в дистрибутив ПС OpenFOAM. Эта задача предполагает исследования в области газовой динамики, а именно в области моделирования несжимаемого потока. При этом применяется решатель `rhoSimpleFoam`, который представляет собой программу для ламинарного или турбулентного потока.

Заключение

В статье представлены результаты исследования, направленного на расширение исходного кода графической оболочки, предназначенной для управления численным моделированием задач механики сплошных сред (МСС) на базе программной среды OpenFOAM. Данная работа является продолжением блока материалов,

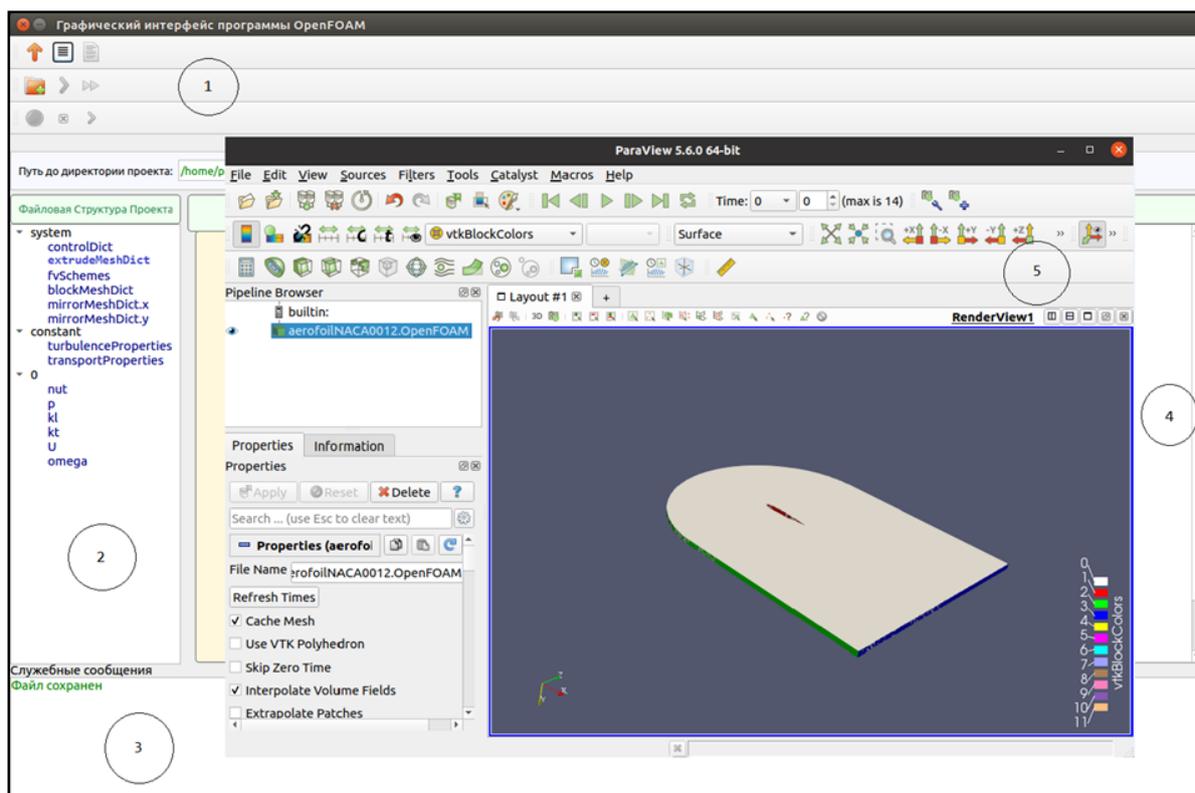


Рис. 2. Главное окно графической оболочки на этапе отображения результатов численного эксперимента на примере учебной задачи, входящей в дистрибутив ПС OpenFOAM

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

посвященных разработке графической оболочки для проведения численных исследований в области МСС на базе программного комплекса OpenFOAM. С момента начала работы над проектом в 2016 г. исходный код графической оболочки расширился за счет программных модулей, упрощающих проведение различных этапов пре- и постпроцессинга численного эксперимента. Тем самым был расширен список возможностей специалиста в рамках работы над созданием численной модели задачи МСС. Это сделало возможным применение приложения к большому количеству типов задач МСС.

В рамках исследования выполнены следующие работы:

1) разработан, отлажен и протестирован программный код, обеспечивающий формирование и визуализацию элементов графического интерфейса приложения для заполнения параметрами файла-словаря `extrudeMeshDict` расчетного случая;

2) разработаны и перенесены на программный код алгоритмы, обеспечивающие создание и заполнение файла-словаря `extrudeMeshDict` с параметрами экструзии РС;

3) разработаны валидаторы элементов управления экранных форм для защиты от ввода данных неверного типа;

4) реализована возможность создания нового файла-словаря `extrudeMeshDict` с параметрами экструзии и изменения параметров существующего;

5) реализована возможность создания нескольких вариантов файла-словаря `extrudeMeshDict` с различными наборами параметров экструзии для одного и того же расчетного случая;

6) реализован механизм программного запуска генерации РС на базе утилиты `extrudeMesh`, а также визуализации результатов средствами пакета `ParaView`;

7) код программного модуля интегрирован в исходный код базовой версии графической оболочки.

К положениям, составляющим научную новизну работы, можно отнести представленные ниже пункты.

1. Сериализация параметров экструзии РС. Механизм, позволяющий с помощью модуля

`Pickle` и СУБД `SQLite` выполнять сохранение параметров в `pickle`-объекты или выполнять их сохранение в формате таблиц реляционной СУБД `SQLite`. С помощью данного механизма можно выполнить восстановление параметров для последующего редактирования.

2. Разработан алгоритм проверки комплектности расчетного случая перед запуском утилиты `extrudeMesh`. Например, данный алгоритм обеспечивает проверку наличия файла-словаря `extrudeMeshDict` перед запуском численного моделирования задачи МСС.

3. Разработан алгоритм подготовки нескольких версий файла-словаря `extrudeMeshDict`, что обеспечивает возможность создания нескольких вариантов файлов-словарей для различных исходных условий и выбора необходимого при проведении эксперимента.

Практическая значимость результатов исследования, представленного в настоящей статье, может выражаться в экономии рабочего времени при подготовке РС на базе утилиты `extrudeMesh`, снижении вероятности ошибок этапа препроцессинга численного эксперимента и снижении вероятности получения численной модели, не соответствующей реальному процессу, а также в упрощении проведения численного эксперимента. Исходный код представленного программного модуля интегрирован в исходный код базовой версии графической оболочки для выполнения численных исследований на базе ПС OpenFOAM. Предполагается продолжение исследований в рассматриваемом направлении и подготовка программных модулей для новых утилит и программ-решателей ПС OpenFOAM.

Литература

1. OpenFOAM. The open source CFD toolbox. URL: <https://www.openfoam.com> (дата обращения 10.12.2021).
2. Читалов Д.И. и др. Разработка графического интерфейса пользователя для программного комплекса OpenFOAM // Программная инженерия. 2016. Т. 7. № 12. С. 568-574.
3. Читалов Д.И. и др. Разработка модуля для реализации зеркального отображения расчетных сеток вокруг заданной плоскости в графическом интерфейсе пользователя платформы `openfoam` // Программная инженерия. 2019. Т. 10. №7-8. С. 297-304.

4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Salome. The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation. URL: <http://www.salome-platform.org/> (дата обращения: 10.12.2021).
8. Helyx-OS. Open-source GUI for OpenFOAM. URL: <http://engys.com/products/helyx-os> (дата обращения: 10.12.2021).
9. 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: 10.12.2021).
10. Ченцов П.А. Об одном подходе к построению интерфейсов консольных приложений: технология TextControlPages // Программная инженерия. 2016. №12. С. 539-546.
11. ParaView. URL: <https://www.paraview.org/> (дата обращения: 10.12.2021).
12. АО ГРЦ им. Макеева. URL: <http://www.makeyev.ru/> (дата обращения: 10.12.2021).
13. OpenFOAM. User Guide. URL: <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf> (дата обращения: 10.12.2021).
14. OpenFOAM. Tutorial Guide. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/tutorial-guide/index.php> (дата обращения: 10.12.2021).
15. PyQt5 Reference Guide. URL: <http://pyqt.sourceforge.net/Docs/PyQt5/> (дата обращения: 10.12.2021).
16. Python 3.7 documentation. URL: <https://devdocs.io/python~3.7/> (дата обращения: 10.12.2021).
17. 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.
18. OpenFOAM_GUI. URL: https://github.com/DmitryChitalov/OpenFOAM_GUI (дата обращения: 10.12.2021).

Читалов Дмитрий Иванович. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского отделения Российской академии наук, Челябинская обл. г. Миасс. Младший научный сотрудник. Количество печатных работ: 32. Область научных интересов: информационные технологии, программирование, численное моделирование. E-mail: cdi9@yandex.ru

Development of a Module for Preparing Computational Meshes by Extrusion and its Integration Into OpenFOAM

D. I. Chitalov

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

Abstract. The study presented in this paper is devoted to the integration into the graphical shell of the OpenFOAM software environment of a module that provides the preparation of computational meshes by extrusion when performing numerical simulation of problems in continuum mechanics. The graphical shell of the OpenFOAM environment was developed by the author to replace the traditional approach of working with the command line with the approach of using a window interface that is more familiar to a specialist. The problem of the lack of a built-in graphical shell for OpenFOAM remains relevant, since existing software solutions are not without flaws. The software module allows you to determine the extrusion parameters of computational meshes through the usual screen forms and save them in the extrudeMeshDict dictionary file of the computational case. The paper describes the extrudeMesh utility built into OpenFOAM and provides extrusion of meshes, as well as a description of the structure of the extrudeMeshDict dictionary file. The author formulated the goals of the study and the set of tasks necessary to achieve them. The stack of technologies required for preparing, debugging and testing the program code of the module is presented. A block diagram is given that reflects the logic of the module, the results of its testing are given on the example of one of the training

problems of continuum mechanics included in the OpenFOAM distribution. The final conclusions are formulated, the expected practical significance of the study and its scientific novelty are determined.

Keywords: numerical simulation, continuum mechanics, graphical user interface, OpenFOAM, open source software, extrudeMesh utility.

DOI 10.14357/20718632220109

References

1. OpenFOAM. The open source CFD toolbox. Available at: <https://www.openfoam.com> (accessed December 12, 2021).
2. Chitalov, D.I., E.S. Merkulov, and S.T. Kalashnikov. 2016. Razrabotka graficheskogo interfejsa pol'zovatelya dlya programmnoogo kompleksa OpenFOAM [Development of a Graphical User Interface for the OpenFOAM Toolbox]. *Programmnyaya inzheneriya* [Software engineering journal] 12:568-574.
3. Chitalov, D.I. 2019. Razrabotka modulya dlya realizacii zerkal'nogo otobrazheniya raschetnyh setok vokrug zadannoj ploskosti v graficheskom interfejsе 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]. *Programmnyaya inzheneriya* [Software engineering journal] 7-8:297-304.
4. 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]. *Programmnyaya inzheneriya* [Software engineering journal] 2:108-114.
5. Chitalov, D.I. 2020. Razrabotka modulya dlya izmel'cheniya yacheek raschetnyh setok v neskol'kih napravleniyah i ego integraciya v gui dlya programmnoj 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.
6. 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.
7. Salome. The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation. Available at: <http://www.salome-platform.org/> (accessed December 12, 2021).
8. Helyx-OS. Open-source GUI for OpenFOAM. Available at: <http://engys.com/products/helyx-os> (accessed December 12, 2021).
9. 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 December 12, 2021).
10. 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]. *Programmnyaya inzheneriya* [Software engineering journal] 12:539-546.
11. ParaView. Available at: <https://www.paraview.org/> (accessed December 12, 2021).
12. JSC GRTs im. Makeeva. Available at: <http://www.makeyev.ru/> (accessed December 12, 2021).
13. OpenFOAM. User Guide. Available at: <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf> (accessed December 12, 2021).
14. OpenFOAM. Tutorial Guide. Available at: <https://www.openfoam.com/documentation/tutorial-guide/index.php> (accessed December 12, 2021).
15. PyQt5 Reference Guide. Available at: <http://pyqt.sourceforge.net/Docs/PyQt5/> (accessed December 12, 2021).
16. Python 3.7 documentation. Available at: <https://devdocs.io/python~3.7/> (accessed December 12, 2021).
17. Pashchenko, D.S. 2017. Otrazhenie v rossijskoj praktike mirovyh tendencij v tekhnologiyah, sredstvah i podhodah v razrabotke programmnoogo obespecheniya [Reflection in Russian practice of world trends in technologies, tools and approaches in software development]. *Programmnyaya inzheneriya* [Software engineering journal] 8:339-344.
18. OpenFOAM_GUI. Available at: https://github.com/DmitryChitalov/OpenFOAM_GUI (accessed December 12, 2021).

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