

УДК 04.0:04

Интеграция системы вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent в программный комплекс 1-d моделирования PRADIS

Штанов Евгений Леонидович^{1,2} shtanov_evgenii@mail.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, аспирант

² ООО «Ладуга», программист

Представлен подход для интеграции системы вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent и среды системного моделирования PRADIS. Описан реализованный метод косимуляции. Проведены вычислительные эксперименты на искусственно созданных моделях. Показаны физически интерпретируемые результаты.

Ключевые слова: косимуляция, 1-d моделирование, вычислительная гидродинамика, CFD системы, ANSYS Fluent, UDF функция, распараллеливание UDF

Введение. Программные комплексы вычислительной гидродинамики (CFD-системы) имеют широкое применение — авиастроение, медицина, двигателестроение, судостроение и т. д. При этом отечественные заводы и конструкторские бюро нередко оснащены рабочими местами с установленными импортными CFD-системами, такими, как ANSYS Fluent. Поэтому задача интеграции импортного ПО является актуальной, несмотря на развитие отечественных систем вычислительной гидро-газодинамики.

Общая постановка задачи. Перед авторами поставлена задача — научиться использовать CFD-моделирование в схемах гидравлической подсистемы, в т. ч. тепловой гидравлики. Использование вычислительной гидродинамики в качестве элемента гидравлической подсистемы значительно расширяет возможности инженеров — позволяет использовать в одной схеме одновременно готовые модели тепловой гидравлики, внедренные в ПК PRADIS, а также сложные модели, разработанные инженерами на предприятиях. В перспективе — возможность одновременного расчета сложной модели с использованием нескольких CFD систем. Все это нацелено на сокращение расходов на создание натурных стендов, уменьшение времени проектирования изделий.

Математическая постановка. Для работы с CFD-системой в рамках 1d моделирования необходимо реализовать многопортовый компонент, для которого можно записать уравнения вида $I(\varphi)$, чтобы записать компонентные и топологические уравнения для узлового метода [1].

Общие сведения о системах вычислительной гидродинамики. В основе решателя ANSYS Fluent лежит метод конечных элементов, используются полигональные сетки, терминология представлена на рис. 2.

Архитектурные особенности ANSYS Fluent. Разработчиками ANSYS Fluent реализован конечный автомат вызова процедур с возможностью переопределения некоторых блок-функций (рис. 3).

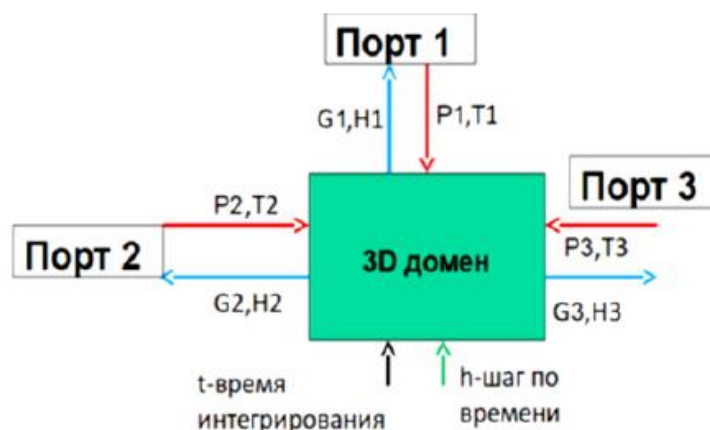


Рис. 1. Описание многополюсника для подсистемы тепловой гидравлики:

H — поток энтальпии, P — давление, T — температура, G — объемный расход

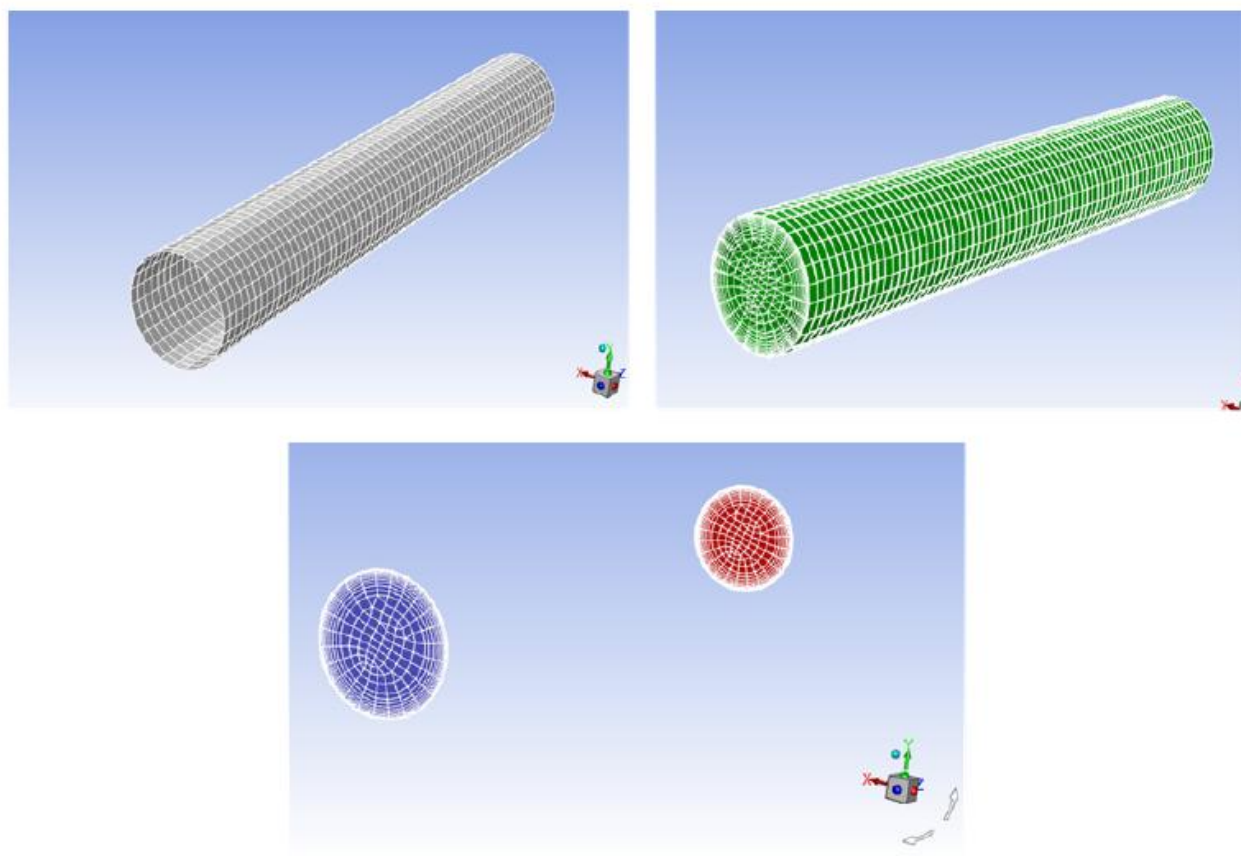


Рис. 2. Основные элементы полигональной аппроксимации 3D-модели: стенка “Wall”, внутренняя область “Interior”, порты: вход и выход — “Inlet”, “Outlet”

В ANSYS Fluent некоторые функции из «Основной процедуры» можно переопределять — т. н. UDF (user defined functions) функции. При этом система включает интерпретатор и компилятор языка Си, поддерживающие специальные макроопределения, функции и типы данных, которые значительно расширяют возможности программирования, в т. ч. позволяют распараллеливать процесс моделирования [3].

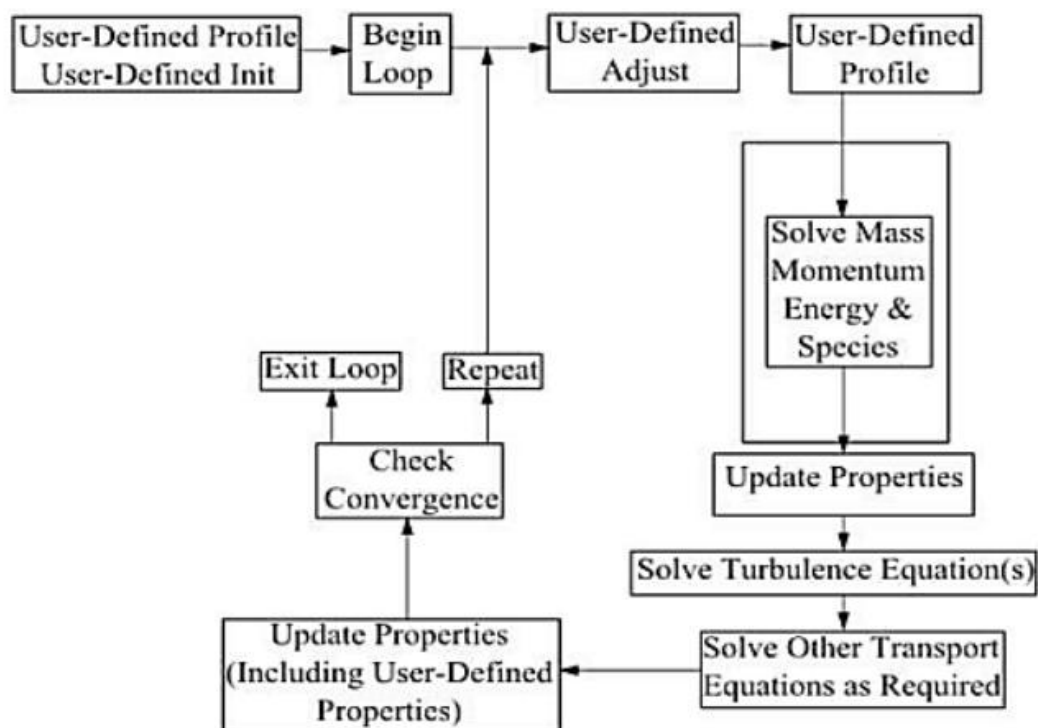


Рис. 3. Блок-схема основной процедуры в ANSYS Fluent [3]

Косимуляция. Интеграция CFD системы идет по принципу совместного моделирования с обменом результатами расчета, соответствующих одному и тому же отрезку времени моделирования.

С этой целью на C++ реализован TCP модуль. Со стороны ПРАДИС модуль подгружается как динамическая библиотека, которая запускает сервер. В UDF функции в свою очередь при инициализации модели запускается клиент (переопределена функция `define_init`). Для работы с этой библиотекой разработан высокоуровневый программный интерфейс, реализующий несколько примитивных функций установления/разрыва соединения, передачи/получения значений, установки/получения рекомендации шага по времени. Клиент входит в состав библиотеки `MasterAPI.lib`, которая статически компилируется вместе с UDF функцией (рис. 4).

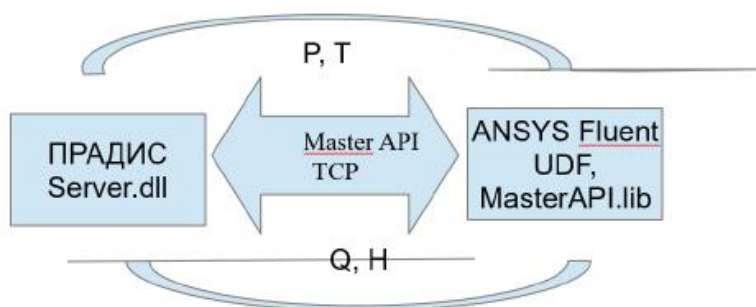


Рис. 4. Схема взаимодействия ПРАДИС-ANSYS Fluent:
P, T — давление, температура, Q, H — объемный расход и поток энтальпии

Примеры совместного моделирования. Результаты. Моделирование гидравлической подсистемы. Для того, чтобы в PRADIS использовать CFD систему в качестве подсхемы необходимо воспользоваться модулем CFD-Module [5], создать схему паспорта и сгенерировать подсхему (рис. 5). В ANSYS Fluent в свою очередь нужно создать 3D модель трубы, скомпилировать UDF функции, прописать эти функции в качестве источников значений на границах “Inlet”, “Outlet” (рис. 2). При этом давление на входе рассчитывается по формуле полного давления:

$$P_{total} = P_{static} + P_{add}, P_{add} = \frac{P_{static}^2 \cdot Ro}{2 \cdot S^2},$$

где к статическому давлению прибавляется динамическая составляющая; Ro — плотность жидкости; S — площадь сечения трубы. Результаты совместного моделирования представлены на рис. 6, 7.

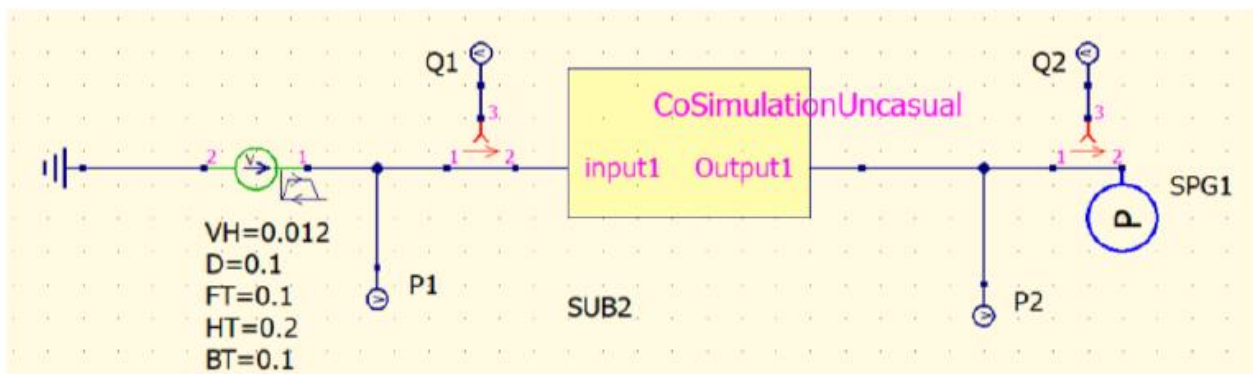


Рис. 5. Схема в ПРАДИС с прямоточной трубой (1 вход и 1 выход) в качестве подсхемы

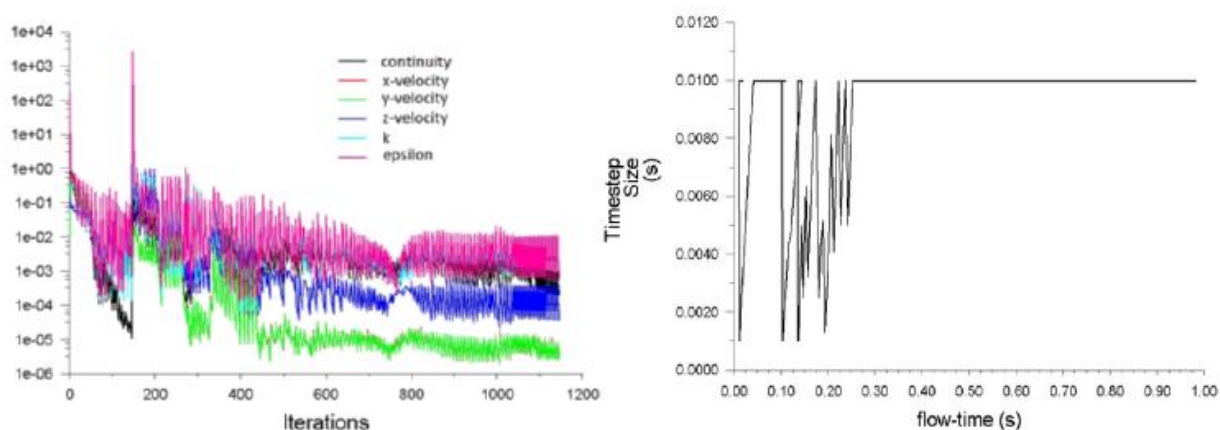


Рис. 6. Графики невязки и адаптивного шага моделирования (в зависимости от числа итераций и времени моделирования)

Графики невязки показывают удовлетворительную тенденцию сходимости.

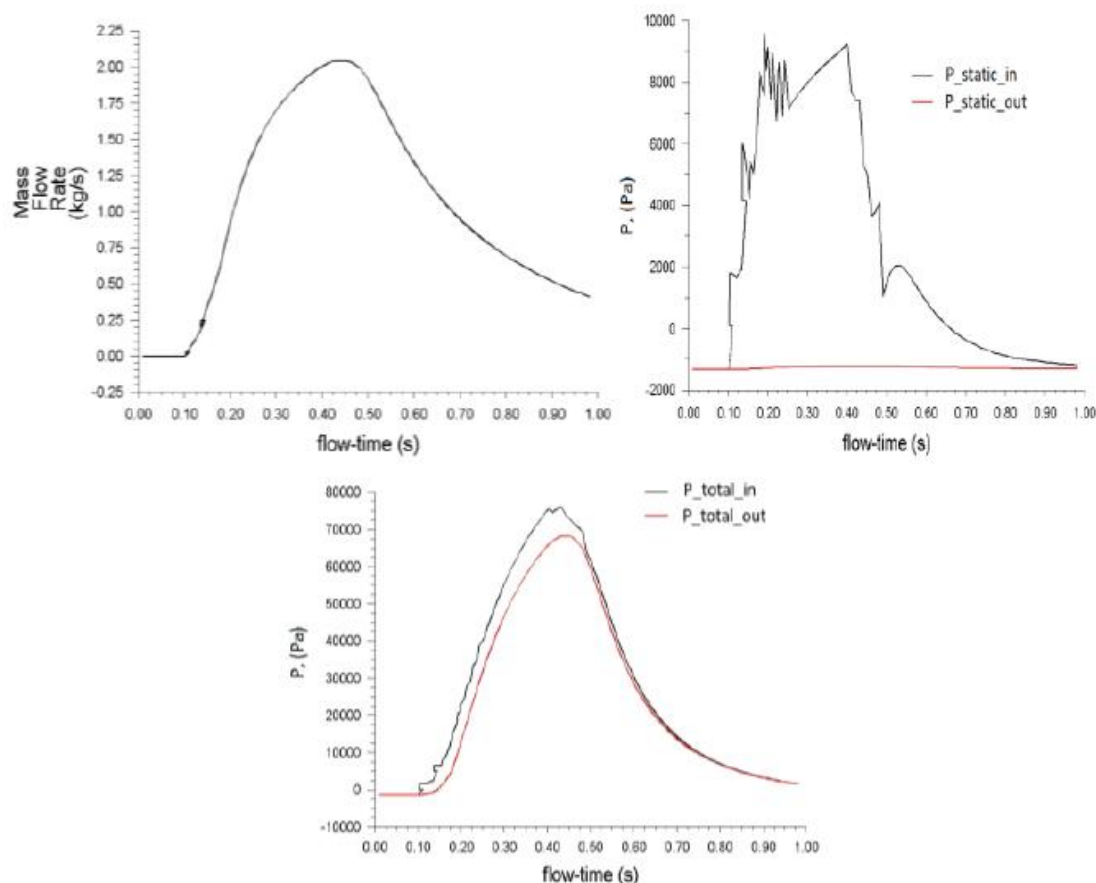


Рис. 7. Графики массового расхода, статического и полного давления в зависимости от времени моделирования

Моделирование подсистемы тепловой гидравлики. Для добавления возможности моделирования тепловой составляющей в ANSYS Fluent необходимо включить в расчет уравнение энергии, а в PRADIS к подсхеме модуля косимуляции подключить источники тепла и задать начальный поток энтальпии (H_{ref} , для воды — 1246863.3 Вт) [3, 4]. Схема выглядит практически идентично, поэтому в данной статье не приводится, но в дистрибутиве PRADIS она имеется.

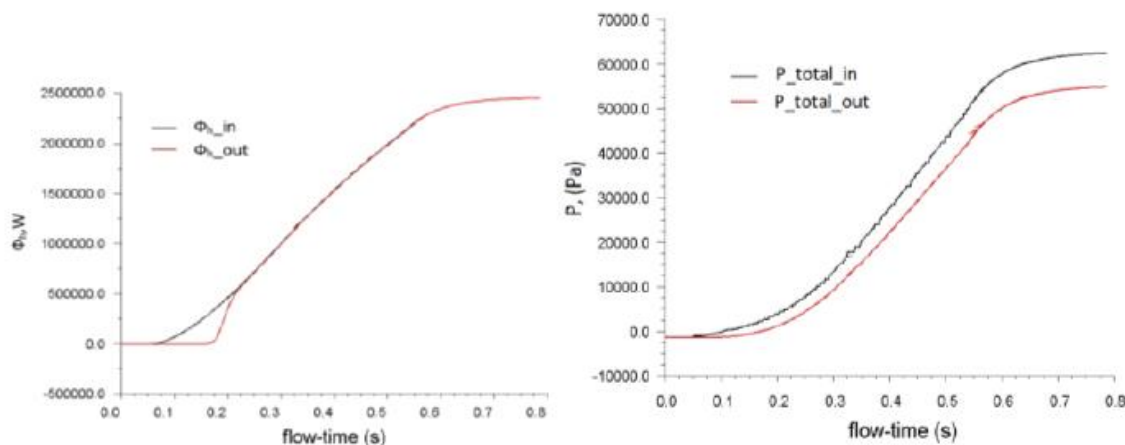


Рис. 8. Графики потока энтальпии и полного давления в зависимости от времени моделирования

Закключение. Программный комплекс вычислительной гидродинамики ANSYS Fluent успешно интегрирован в систему 1-d моделирования PRADIS[6]. Разработан программный интерфейс (API) для использования в пользовательских функциях (UDF — user defined function) ANSYS Fluent. Написана универсальная UDF функция для моделирования процессов тепловой гидравлики. При написании UDF используются директивы препроцессора для распараллеливания вычислений. Получены результаты совместного моделирования (косимуляции), имеющие физическую интерпретацию.

Литература

- [1] Моделирование систем с сосредоточенными параметрами (базовый курс). Узловой метод. URL: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=Mkr/base.cou> (дата обращения 15.09.2025).
- [2] ANSYS Fluent Getting Started Guide. ANSYS, Inc. Southpointe 2600 ANSYS Drive Canonsburg, PA 15317, Release 19.1 April 2018.
- [3] Ansys Fluent Customization Manual. ANSYS, Inc. Southpointe 2600 Ansys Drive Canonsburg, PA 15317, Release 2021 R2 July 2021.
- [4] Ansys Fluent Theory Guide. ANSYS, Inc. Southpointe 2600 Ansys Drive Canonsburg, PA 15317, Release 2021 R2 July 2021.
- [5] Документация к PRADIS/Модули пользователя/CFDModule (CFDModule — PRADIS latest Manual documentation). URL: https://docs.pradis.laduga.ru/user_modules/CFDModule/index_ru.html (дата обращения 15.09.2025).
- [6] Презентация «Пакет системного моделирования “PRADIS” релиз 2024.3». Компания Ладуга.

Integration of the ANSYS Fluent computational fluid dynamics system into the PRADIS 1D simulation system

Shtanov Evgeny Leonidovich^{1,2}

shtanov_evgenii@mail.ru

¹ BMSTU, Moscow, Russia

² Laduga LLC, programmer, Samara, Russia

Computational fluid dynamics (CFD) software packages are widely used in aircraft manufacturing, medicine, engine manufacturing, shipbuilding, and other industries. At the same time, domestic factories and design bureaus often have workstations running imported CFD systems, such as ANSYS Fluent. Therefore, the problem of integrating imported software remains relevant, despite the development of domestic computational fluid dynamics (CFD) systems. The ANSYS Fluent computational fluid dynamics (CFD) software package has been successfully integrated into the PRADIS 1D modeling system. An application programming interface (API) has been developed for use in ANSYS Fluent user-defined functions (UDFs). A universal UDF function has been written for modeling thermal hydraulics processes. When writing UDFs, preprocessor directives are used to parallelize computations. Cosimulation results with a physical interpretation have been obtained.

Keywords: cosimulation, 1D modeling, computational fluid dynamics, CFD systems, ansys fluent, udf function, UDF parallelization