Краткое руководство пользователя ПМК КСКМ Акваимпульс

Содержание

1 Обзор продукта.....3

2 Классы решаемых задач.....3

3 Используемые методы решения 3

4 Примеры решения задач 4

4.1 Сопряженное моделирование 3D гидродинамики с передачей параметров движения твердого тела в сопрягаемую гидродинамическую расчетную модель 4

4.2 Связанное моделирование 3D гидродинамики с движением твердого тела и 1D механики 8

4.3 Связанное моделирование 3D гидродинамики и 1D гидравлики..... 12

4.4 Генерация редуцированной модели насоса с использованием трехмерных расчетов гидродинамических характеристик..... 15

4.5 Связанное моделирование с использованием редуцированной модели насоса... 18

1 Обзор продукта

Программно-методический комплекс для выполнения комплексного суперкомпьютерного моделирования Акваимпульс (ПМК КСКМ) предназначен для выполнения комплексного мультидисциплинарного суперкомпьютерного моделирования при решении специализированных задач судостроения.

ПМК КСКМ позволяет проводить расчеты как на персональных компьютерах, так и на многопроцессорных вычислительных системах.

2 Классы решаемых задач

ПМК КСКМ в интеграции с пакетом программ (ПП) Логос и ПО SimInTech позволяет проводить:

- связанное и сопряженное моделирование различной размерности (3D-3D, 3D-1D) в интересах решения специализированных задач судостроения;
- генерацию редуцированных моделей насоса с использованием трехмерных расчетов гидродинамических характеристик.

3 Используемые методы решения

В ПМК КСКМ используются следующие методы и подходы для решения специализированных задач судостроения:

- конечно-объемный метод для решения 3D задач гидродинамики при описании:
  - движения жидкости в ограниченном объеме и свободном пространстве;
  - движения объекта в жидкости в ограниченном объеме и свободном пространстве;
  - работы насоса (при формировании редуцированной модели);
- 1D подход для динамического моделирования поведения сложных технических систем в точечном приближении и сосредоточенных параметрах;
- методы интерполяции и свертки данных для решения сопряженных и связанных задач;
- различные типы связи для решения связанных задач:
  - 3D гидродинамика с движением твердого тела – 1D механика;
  - 3D гидродинамика – 1D гидравлика;
  - 3D гидродинамика – 1D гидравлика с использованием редуцированной модели насоса;
- методы построения суррогатных моделей для формирования редуцированной модели насоса.

4 Примеры решения задач

В разделе кратко представлены примеры моделирования с использованием ПМК КСКМ. Для каждого примера приведено описание задачи и расчетной модели, а также результаты моделирования.

4.1 Сопряженное моделирование 3D гидродинамики с передачей параметров движения твердого тела в сопрягаемую гидродинамическую расчетную модель

Описание задачи

Рассматривается задача по моделированию движения тела в канале, заполненном жидкостью. Через открытый левый торец в канал поступает жидкость, движение тела обеспечивается воздействием на него гидродинамических сил. Задача решается в сопряженной поэтапной постановке:

– на первом этапе проводится накопление гидродинамических данных на сечении и параметров движения твердого тела;

– на втором этапе происходит передача данных с предыдущего этапа в сопрягаемую расчетную область для дальнейшего расчета задачи.

Расчетная модель для сопряженного моделирования

На рисунке 1 схематично представлены этапы сопряженного расчета. Сечение располагается от входной границы на расстоянии 30% от общей длины модели. Первый и второй этапы пересекаются после сечения и до середины полной модели. На этом участке происходит восстановление гидродинамических полей на втором этапе расчета.

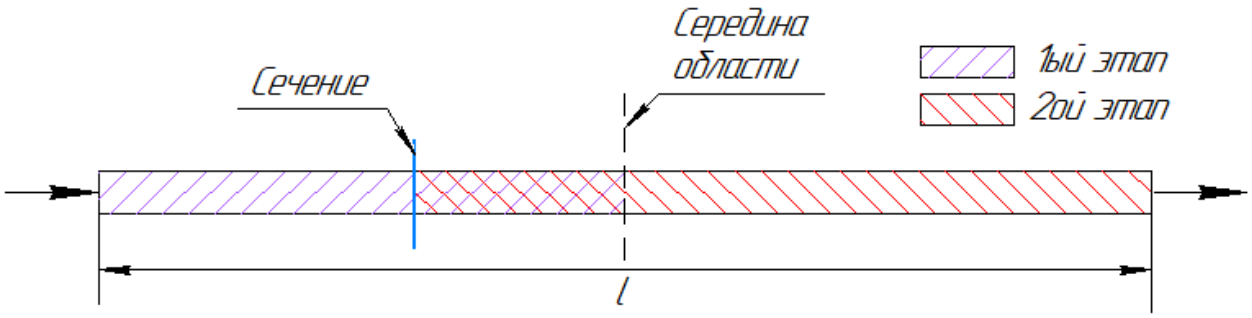


Рисунок 1 – Схема сопряженного расчета

Тело моделируется в ПП Логос как твердое тело. Его движение моделируется с использованием технологии «Химера», предполагающей разбиение расчетной области на регионы, для каждого из которых строится своя сетка с перекрытиями. Стационарный регион описывает область жидкости, подвижный регион формируется вокруг тела.

При создании сопрягаемых расчетных моделей задается нестационарный тип расчета и выбираются ключевые параметры физической модели (рисунок 2):

– тип течения – турбулентный;
– расчет на сетках Химера;
– модель твердого тела.

Физическая модель

Параметр	Значение
Тип течения	турбулентное
Энергия	☐
Многофазность	☐
Гравитация	☐
Многокомпонентные течения	☐
Расчёт на сетках типа Химера	☑
Модель вентилятора	☐
Модель квазичастиц	☐
Подавление акустических волн	☐
Аэроакустика (дальнее поле)	☐
Квазидвижение твердого тела	☐
Модель твёрдого тела	☑
Виртуальный диск	☐
Пассивный скаляр	☐
Связанная задача	Нет

Рисунок 2 – Задание параметров физической модели

Для расчета турбулентности применяется модель SST с автоматическим определением зоны пограничного слоя. Жидкость моделируется как несжимаемая среда с заданной плотностью и вязкостью.

Для тела задаются необходимые параметры твердого тела: масса, положение центра массы, тип движения.

Геометрическая модель и расположение граничных условий для двух этапов представлены на рисунке 3.

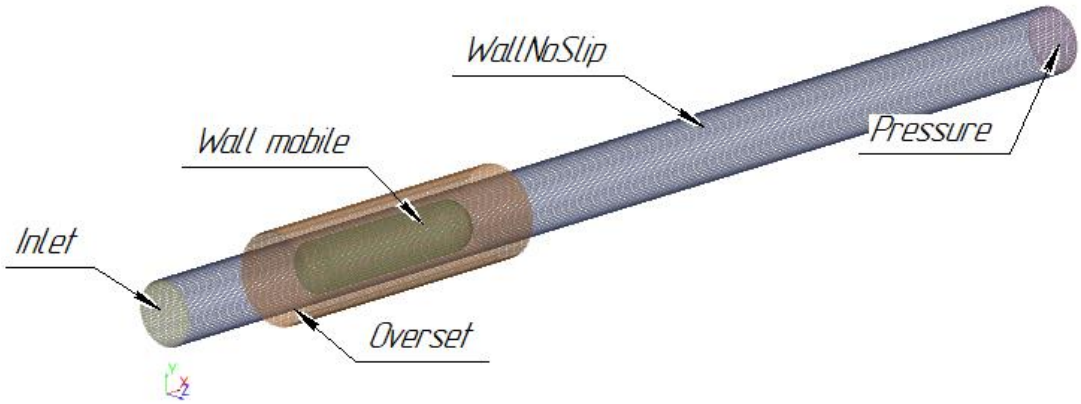


Рисунок 3 – Геометрическая модель и граничные условия

На первом этапе расчета на входе задается постоянная скорость, на выходе постоянное давление. В процессе расчета накапливаются нестационарные гидродинамические характеристики в заданном сечении.

Для второго этапа расчета входное сечение расчетной области располагается в координате заданного сечения. На нем задаются характеристики, накопленные на первом этапе. На выходе задается постоянное давление.

Кроме того, на втором этапе для тела передаются координаты центра масс с первого этапа и скорость его движения. Скорость движения тела задается таблично. Таким образом, на первом этапе тело начинает свое движение под действием гидродинамических сил, а на втором этапе продолжает свое движение согласно данным, взятым с первого этапа.

Подготовка и выполнение сопряженного расчета выполняется в модуле Логос Платформа путем добавления расчетного модуля, импорта моделей ПП Логос, настройки сопряженного расчета, настройки и запуска сценария.

На рисунке 4 показано окно «Редактор сценария», отображающее сценарий расчета сопряженного расчета в Логос Платформа.

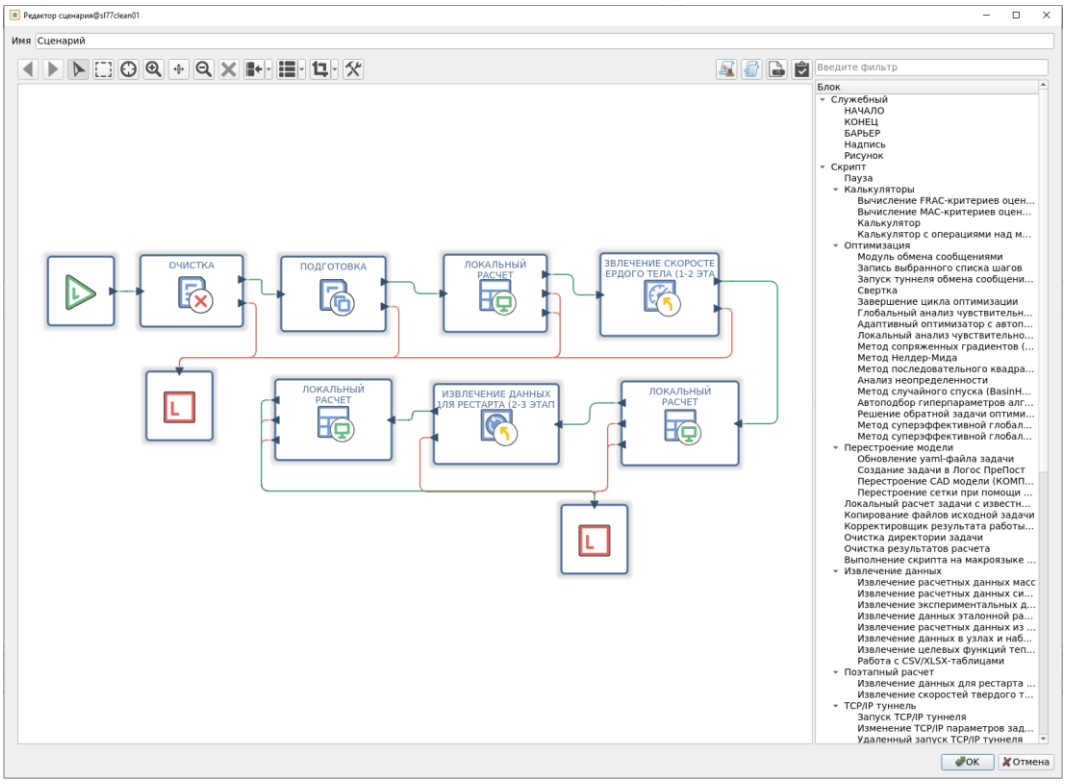


Рисунок 4 – Сценарий сопряженного расчета

Результаты моделирования

На рисунке 5 представлены результаты сопряженного моделирования в сравнении с данными, полученными из расчета для полной модели.

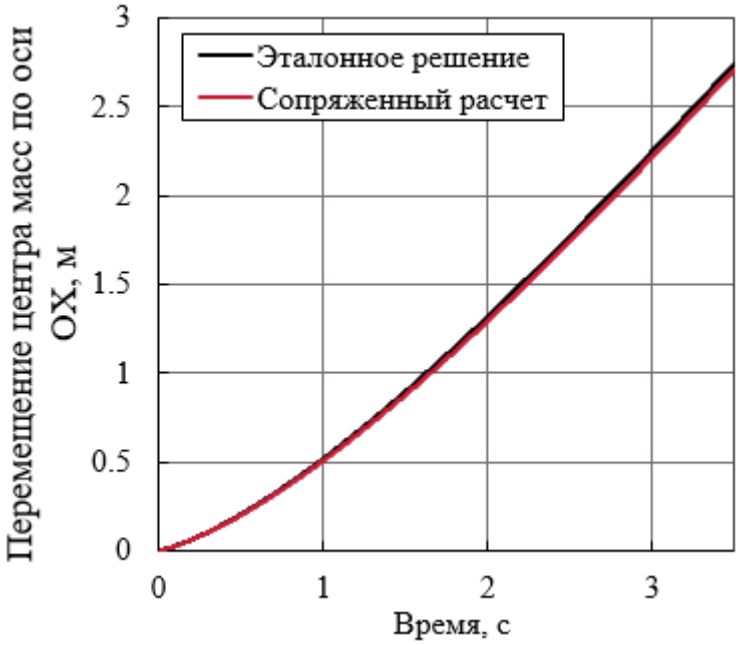


Рисунок 5 – Перемещение центра масс тела в зависимости от времени

4.2 Связанное моделирование 3D гидродинамики с движением твердого тела и 1D механики

Описание задачи

Рассматривается задача по моделированию движения тела в жидкости под действием поршня. В начальный момент времени тело находится в полуограниченном канале, внутри которого расположен кольцеобразный поршень. Под действием внешнего усилия поршень двигается, выталкивая жидкость вместе с телом из канала. Величина внешнего усилия, прикладываемого к поршню, а, следовательно, и параметры его перемещения, зависят от сопротивления, испытываемого им со стороны жидкости.

3D гидродинамическая область (рисунок 6) с подвижным телом и подвижным поршнем моделируется в ПП Логос (3D гидродинамика с движением твердого тела). Внешнее усилие, действующее на поршень, рассчитывается в рамках 1D модели в ПО SimInTech (1D механика). Связанное моделирование осуществляется путем передачи параметров движения поршня из ПО SimInTech в ПП Логос и передачи силы сопротивления, возникающей на поршне при его движении, из ПП Логос в ПО SimInTech. Тело двигается под действием гидродинамических сил вдоль оси OX.

Цель расчета – получение зависимости перемещения поршня от времени.

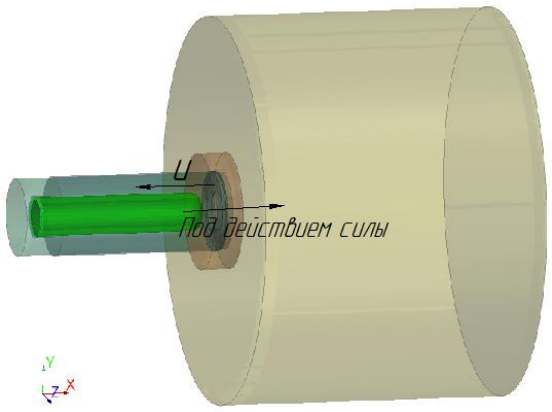


Рисунок 6 – Схема 3D расчетной области

Расчетная модель для связанного моделирования

Тело и поршень моделируются в ПП Логос как твердые тела. Их движение моделируется с использованием технологии «Химера», предполагающей разбиение расчетной области на регионы, для каждого из которых строится своя сетка с перекрытиями. Стационарный регион описывает область жидкости, два подвижных региона формируются вокруг тела и вокруг поршня.

Схема расположения граничных условий для 3D расчетной области показана на рисунке 7.

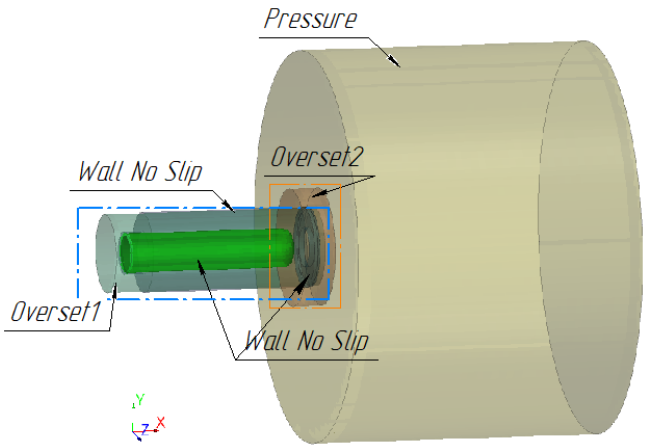


Рисунок 7 – Граничные условия для 3D расчетной области

При создании расчетной модели для моделирования 3D гидродинамики с движением твердых тел задается нестационарный тип расчета и выбираются ключевые параметры физической модели:

– тип течения – турбулентный;
– расчет на сетках Химера;
– модель твердого тела.

Для расчета турбулентности применяется модель SST с автоматическим определением зоны пограничного слоя. Жидкость моделируется как несжимаемая среда с заданной плотностью и вязкостью.

Для поршня и тела задаются необходимые параметры твердых тел: масса, положение центра массы, тип движения (для поршня – заданное перемещение и вращение, для тела – под действием сил и моментов).

Подготовка и выполнение связанного расчета выполняется в модуле Логос Платформа путем добавления расчетных модулей, импорта моделей ПП Логос и ПО SimInTech, настройки связанного расчета, настройки и запуска сценария. На рисунке 8 показаны этапы добавления расчетных модулей и импорта моделей.

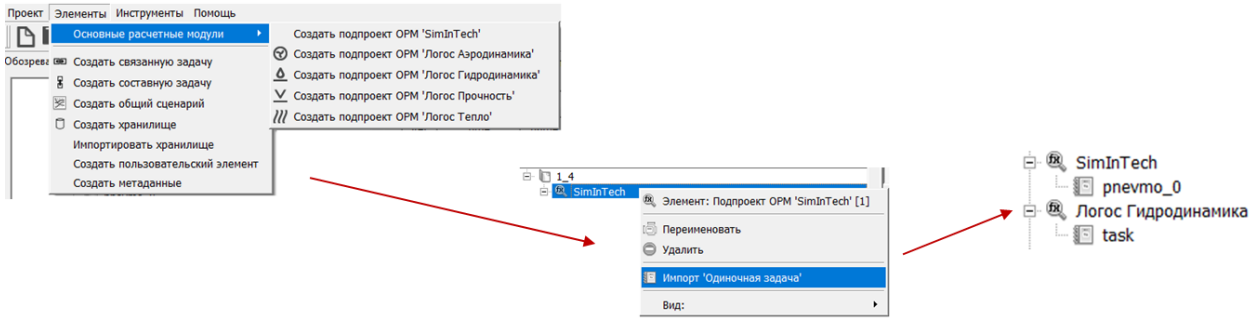


Рисунок 8 – Добавление расчетных модулей, импорт моделей

На рисунке 9 показано окно «Редактор сценария», отображающее сценарий расчета связанного расчета в Логос Платформа.

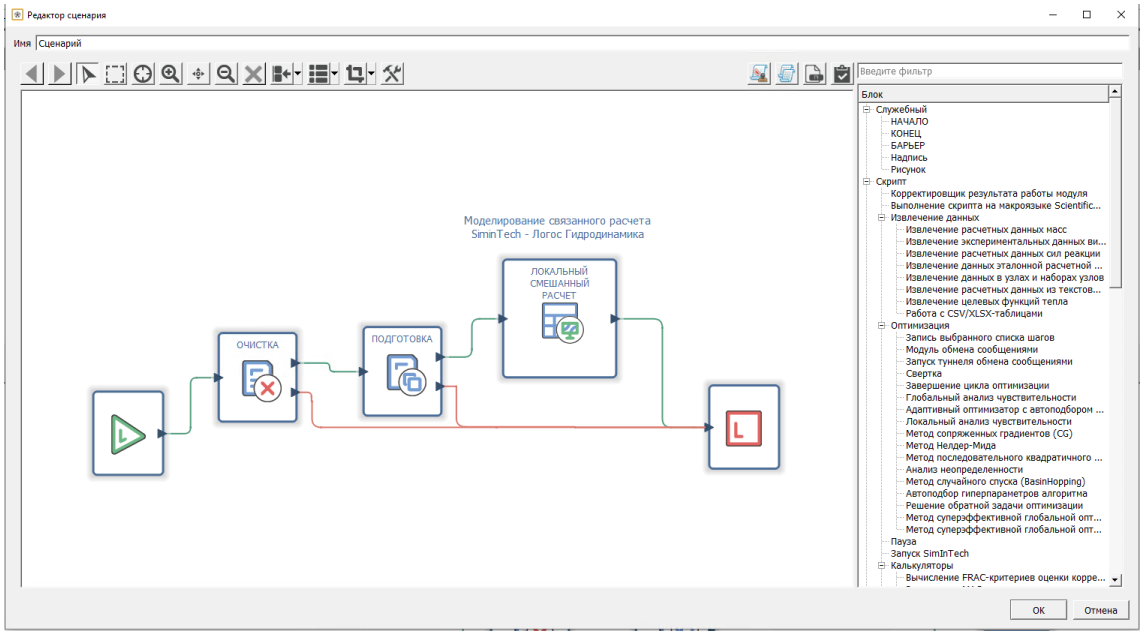


Рисунок 9 – Сценарий связанного расчета

Результаты моделирования

На рисунке 10 представлен фрагмент лога обменных параметров (скорости поршня и силы сопротивления на поршне) на начальных шагах моделирования.

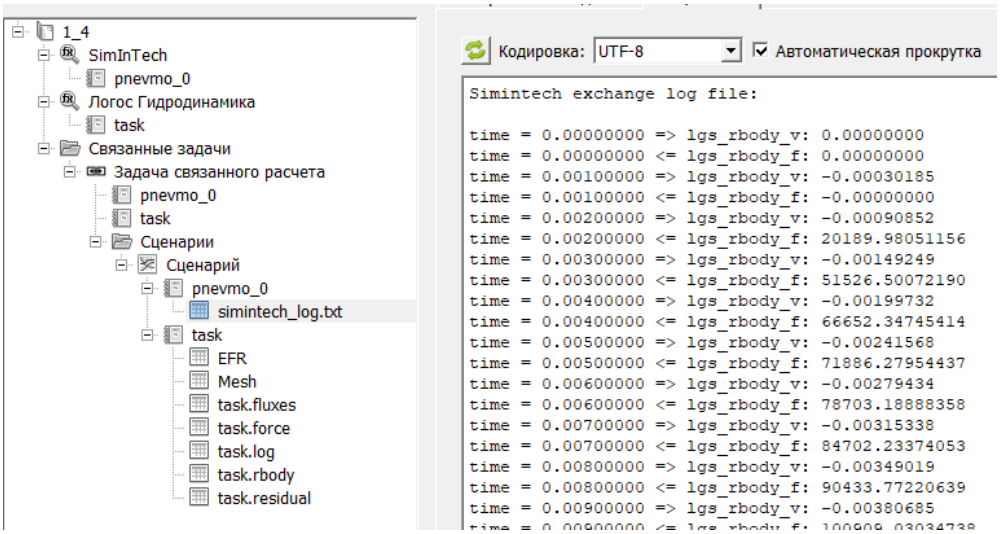


Рисунок 10 – Фрагмент лога обменных параметров

Для получения зависимости перемещения тела от времени, которое является целью проведения расчета, выполняется анализ файла с расширением rbody (рисунок 11).

iter	time	name	RB_CX	RB_CY	RB_CZ	RB_RotAngleX	RB_RotAngleY	RB_RotAngleZ	RB_VelX
1	1.00000e-03	Body_1	0.00000e+00	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	0.00000e+00
2	2.00000e-03	Body_1	-3.01853e-04	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	-3.01853e-01
3	3.00000e-03	Body_1	-1.21038e-03	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	-9.08524e-01
4	4.00000e-03	Body_1	-2.70287e-03	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	-1.49249e+00
5	5.00000e-03	Body_1	-4.70019e-03	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	-1.99732e+00
6	6.00000e-03	Body_1	-7.11588e-03	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	-2.41568e+00
7	7.00000e-03	Body_1	-9.91021e-03	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	-2.79434e+00
8	8.00000e-03	Body_1	-1.30636e-02	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	-3.15338e+00
9	9.00000e-03	Body_1	-1.65538e-02	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	-3.49019e+00
10	1.00000e-02	Body_1	-2.03606e-02	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	-3.80685e+00
11	1.10000e-02	Body_1	-2.44593e-02	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	-4.09866e+00
12	1.20000e-02	Body_1	-2.90700e-02	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	-4.61075e+00
13	1.30000e-02	Body_1	-3.36808e-02	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	-4.61075e+00
14	1.40000e-02	Body_1	-3.85052e-02	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	-4.82446e+00
15	1.50000e-02	Body_1	-4.35016e-02	0.00000e+00	0.00000e+00	-0.00000e+00	-0.00000e+00	0.00000e+00	-4.99631e+00

Рисунок 11 – Данные из файла *.rbody

В столбце «time» выводится время, в столбце «RB_CX» – координата центра масс тела по оси OX, меняющаяся с течением времени.

4.3 Связанное моделирование 3D гидродинамики и 1D гидравлики

Описание задачи

Рассматривается задача по моделированию смешения потоков жидкости в тройниковом соединении трубопровода. На рисунке 12 показана геометрия 3D расчетной области, которая моделируется в ПП Логос (3D гидродинамика). Тройниковое соединение имеет два входа (1 и 2 на рисунке 12), на которые подается расход, и один выход – граница с заданным давлением (3 на рисунке 12).

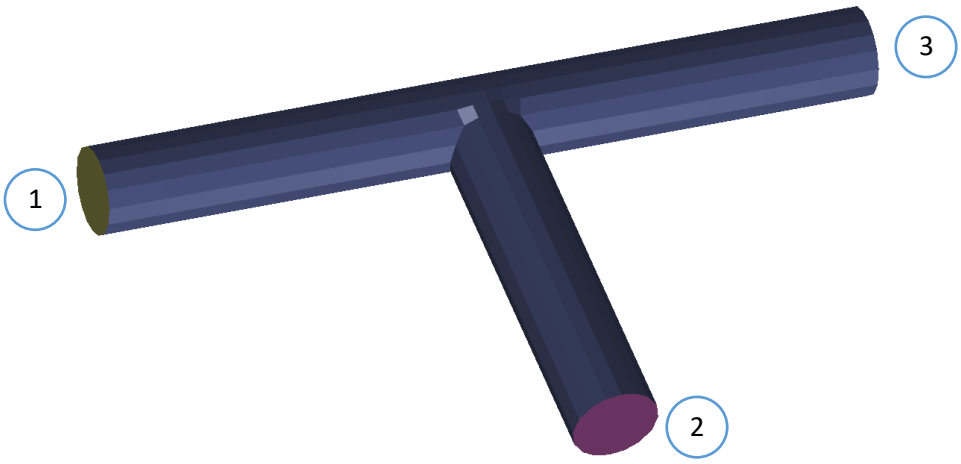


Рисунок 12 – Геометрия 3D расчетной области

Остальная часть трубопроводной системы моделируется в рамках 1D модели в ПО SimInTech (1D гидравлика).

Связанное моделирование осуществляется путем передачи параметров граничных условий:

– на границах 1 и 2 из ПО SimInTech в ПП Логос передаются значения расходов G (и опционально температуры T) жидкости, из ПП Логос в ПО SimInTech – значения давления P;

– на границе 3 из ПО SimInTech в ПП Логос передается значения давления P, из ПП Логос в ПО SimInTech – значение расхода G (и опционально температуры T).

Расчетная модель для связанного моделирования

На рисунке 13 показана схема взаимодействия ПП Логос и ПО SimInTech при связанном моделировании.

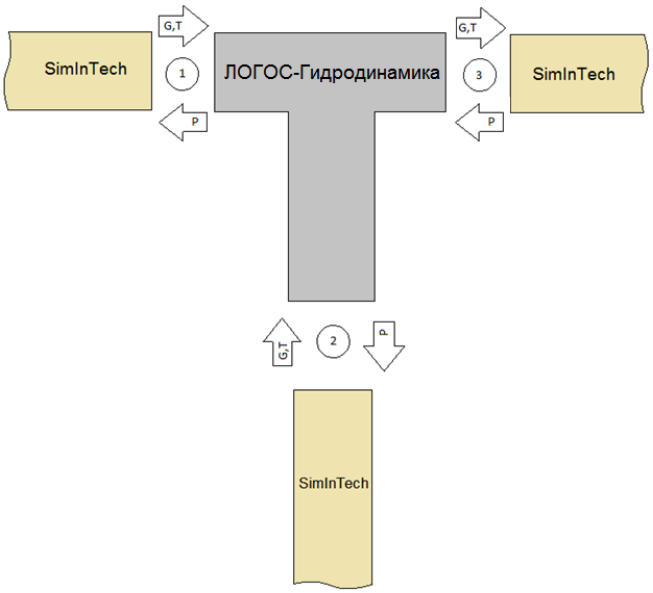


Рисунок 13 – Схема взаимодействия ПП Логос и ПО SimInTech

При создании расчетной модели для моделирования 3D гидродинамики задается нестационарный тип расчета и выбирается турбулентный тип течения. Для расчета турбулентности применяется модель SST с автоматическим определением зоны пограничного слоя. Жидкость моделируется как несжимаемая среда с заданной плотностью и вязкостью.

Подготовка и выполнение связанного расчета выполняется в модуле Логос Платформа путем добавления расчетных модулей, импорта моделей ПП Логос и ПО SimInTech, настройки связанного расчета, настройки и запуска сценария.

Результаты моделирования

На рисунке 14 представлен фрагмент лога обменных параметров (значений расхода, температуры и давления на входах 1 и 2 и выходе 3) на начальных шагах моделирования.

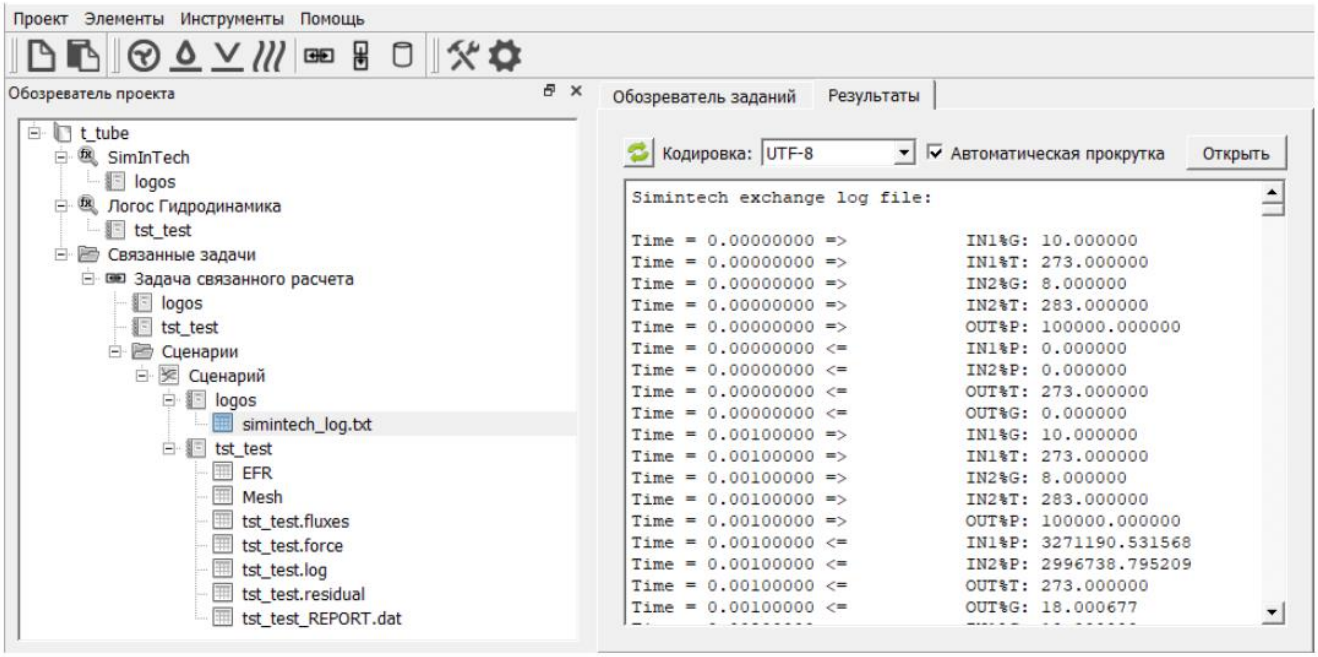


Рисунок 14 – Фрагмент лога обменных параметров

На рисунке 15 представлено поле температуры в тройнике на момент времени 1 с, демонстрирующее смешение входных потоков.

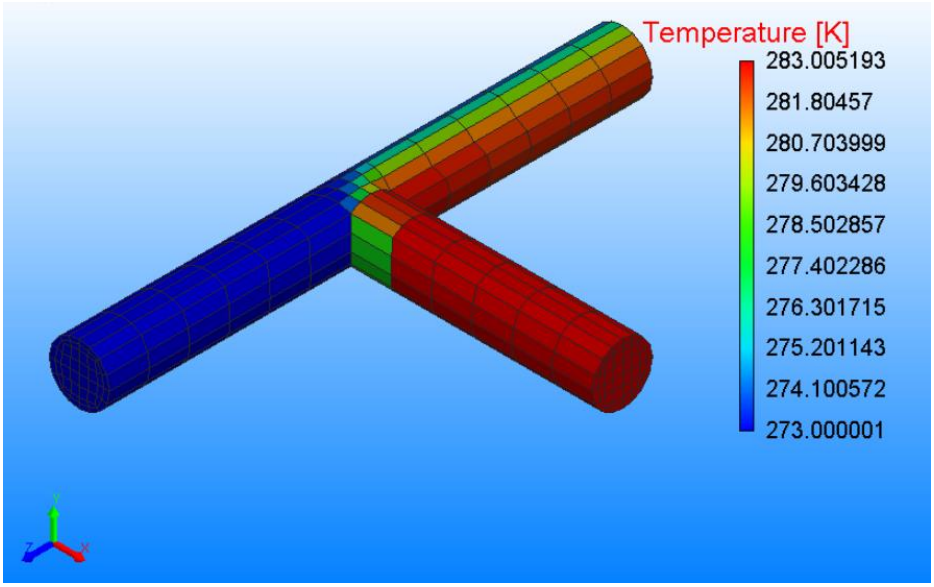


Рисунок 15 – Поле температуры в тройнике

4.4 Генерация редуцированной модели насоса с использованием трехмерных расчетов гидродинамических характеристик

Описание задачи

Целью является построение редуцированной (суррогатной) модели (ROM) насоса, описывающей его гидродинамические характеристики в широком диапазоне режимов работы. В качестве целевых параметров используются:

– перепад давления на насосе ΔP;

– гидродинамический момент на рабочем колесе M.

Для получения исходных данных применяется вложенный CFD-сценарий, автоматически выполняющий в ПП Логос серию расчетов насоса при различных значениях варьируемых параметров (X-параметры). Результатом каждого расчета являются значения перепада давления и момента на колесе (Y-функции).

Обмен данными между CFD-сценарием и алгоритмом аппроксимации осуществляется через модуль построения редуцированной модели, который накапливает результаты расчетов и формирует обучающую выборку.

Общая схема построения редуцированной модели показана на рисунке 16.



Рисунок 16 – Общая схема построения редуцированной модели

На начальном этапе пространство параметров дискретизируется с обеспечением равномерного заполнения расчетного диапазона. Для каждой точки выборки

автоматически запускается CFD-расчет, полученные данные передаются в аппроксиматор, который:

– строит текущую редуцированную модель;
– оценивает точность аппроксимации;
– определяет области с наибольшей неопределенностью;
– выбирает новые расчетные точки.

После выполнения очередного CFD-расчета редуцированная модель перестраивается с учетом новых данных. Процесс повторяется итерационно до достижения заданного критерия точности. Формируется набор CFD-точек, обеспечивающий требуемую точность описания характеристик насоса.

На основе полученной обучающей выборки строится конечная редуцированная модель, позволяющая восстанавливать значения перепада давления ΔP и момента M для промежуточных режимов работы без выполнения дополнительных CFD-расчетов.

Таким образом, вместо трудоемкого трехмерного моделирования используются мгновенные обращения к редуцированной модели, что существенно снижает вычислительные затраты при сохранении необходимой точности описания гидродинамики насоса.

Расчетная модель

На рисунке 17 представлена схема расчетной области для выполнения CFD-расчетов в ПП Логос.

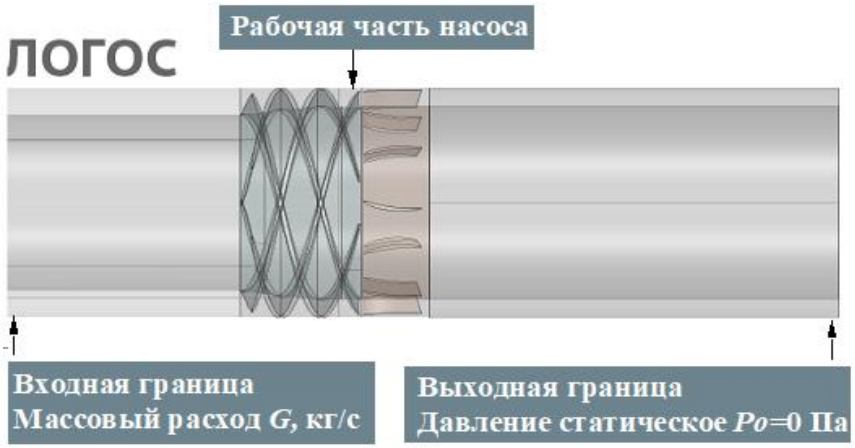


Рисунок 17 – Схема расчетной области

Для записи результатов расчетов (Y-функции) применяется механизм мониторинга величин для записи значений перепада давления на насосе ΔP и гидродинамического момента на рабочем колесе M.

В качестве варьируемых параметров определяются массовый расход и частота вращения.

На рисунке 18 показан сценарий построения редуцированной модели в Логос Платформа, который представляет собой двухуровневый сценарий, содержащий

подсценарий параметрического исследования, в котором осуществляются CFD-расчеты с заданными варьируемыми параметрами.

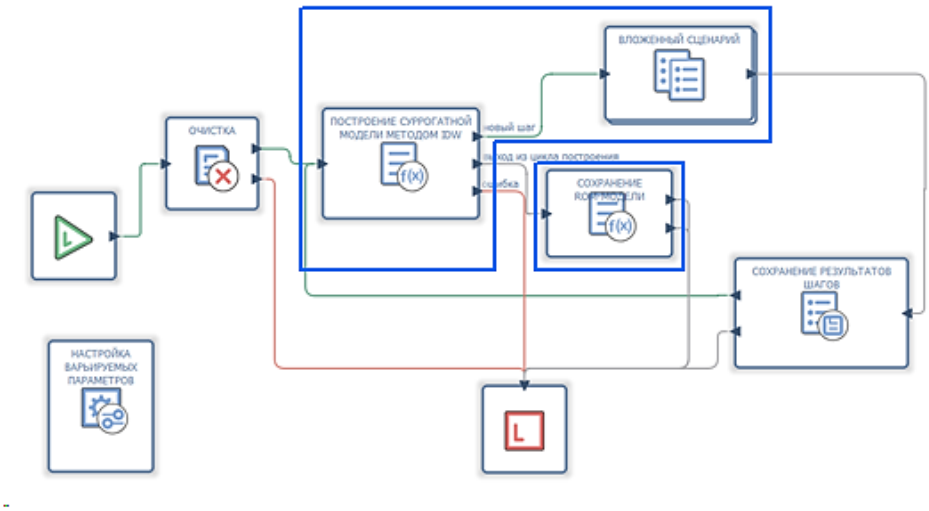


Рисунок 18 – Сценарий построения редуцированной модели

Результаты моделирования

В результате построения суррогатной модели в директории проекта формируется архив «rom_model.tar», в котором находится CSV-таблица точек редуцированной модели, JSON-файл метаинформации о редуцированной модели и файл зашифрованной контрольной суммы для проверки целостности данных модели (рисунок 19).

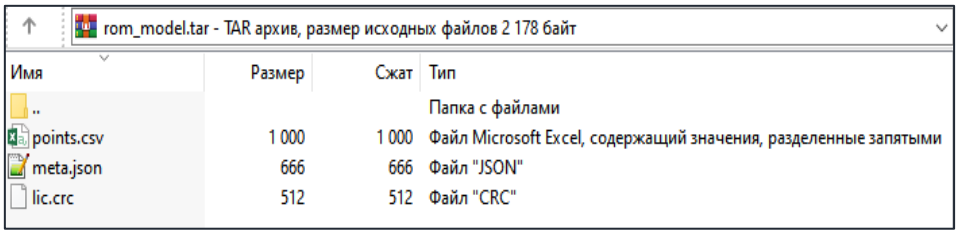


Рисунок 19 – Архив, содержащий редуцированную модель

4.5 Связанное моделирование с использованием редуцированной модели насоса

Описание задачи

Рассматривается задача по моделированию течения жидкости в системе, включающей насос, представленный редуцированной моделью. Общий вид 3D гидродинамической области, моделируемой в ПП Логос, показан на рисунке 20. В области находится пористая вставка, имитирующая дополнительное сопротивление среды.

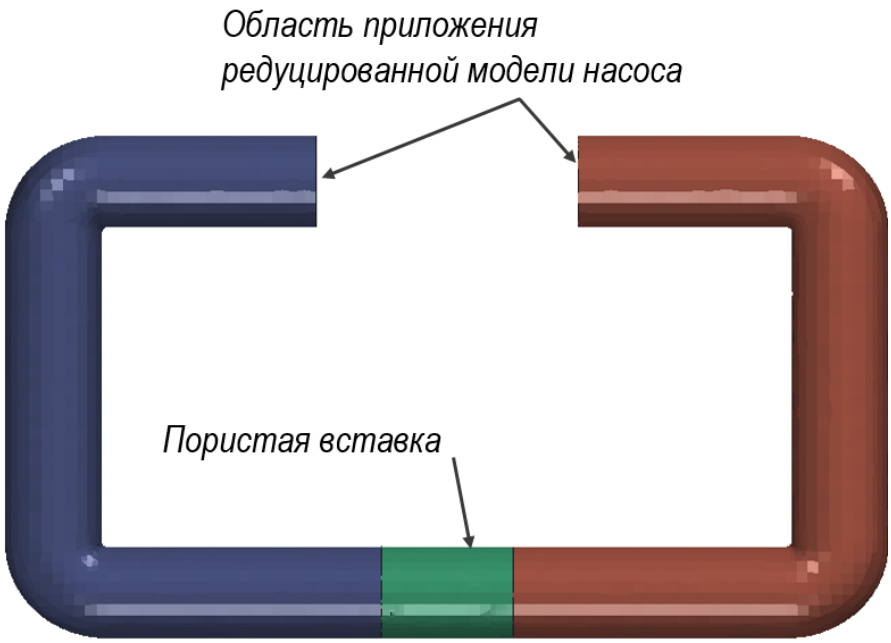


Рисунок 20 – Общий вид гидродинамической расчетной модели

В модели ПО SimInTech в 1D приближении смоделирован электродвигатель. Модель вращения учитывает внешний момент сопротивления со стороны насоса.

В начальный момент времени система находится в равновесии, старт процесса инициируется пуском электродвигателя. По мере нарастания частоты вращения внешний момент сопротивления увеличивается и приводит к установлению равновесного процесс – работе электронасоса в номинальном режиме.

Связанное моделирование осуществляется посредством обращения ПП Логос и ПО SimInTech к редуцированной модели. В ПП Логос из редуцированной модели подается частота вращения – параметр, определяющий производительность насосной системы и характеризующий текущий режим работы. В ПО SimInTech из редуцированной модели подается момент на лопастях – параметр, определяющий нагрузку на приводную систему и потребляемую мощность.

Расчетная модель

При создании расчетной модели для моделирования 3D гидродинамики задается нестационарный тип расчета и выбирается турбулентный тип течения. Для расчета турбулентности применяется модель SST с автоматическим определением зоны пограничного слоя. Жидкость моделируется как несжимаемая среда с заданной плотностью и вязкостью.

Схема расположения граничных условий показана на рисунке 21.

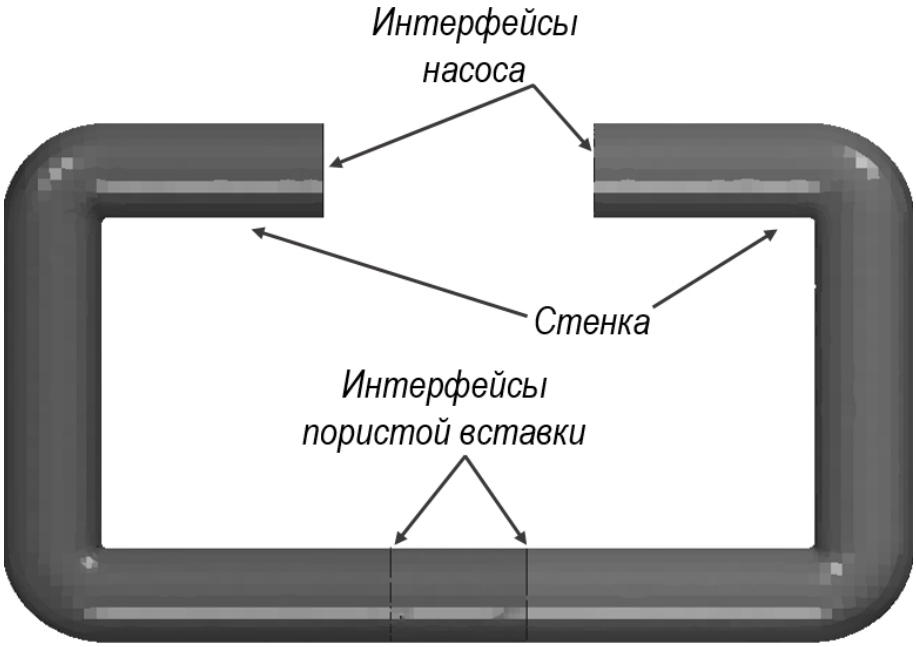


Рисунок 21 – Граничные условия

На интерфейсах насоса задается граничное условие «Вентилятор» со следующими параметрами:

– ΔP(Q) – параметры редуцированной модели насоса rom_model.tar для частоты вращения РК 25 об/с;
– тип – заданный ΔP;
– рабочий диапазон массового расхода Q от 400 до 1700 кг/с.

Подготовка и выполнение связанного расчета выполняется в модуле Логос Платформа путем добавления расчетных модулей, импорта моделей ПП Логос и ПО SimInTech, настройки блока «Обновление YAML задачи гидродинамики», настройки и запуска сценария.

На рисунке 22 показано окно «Редактор сценария», отображающее сценарий расчета связанного расчета в Логос Платформа.

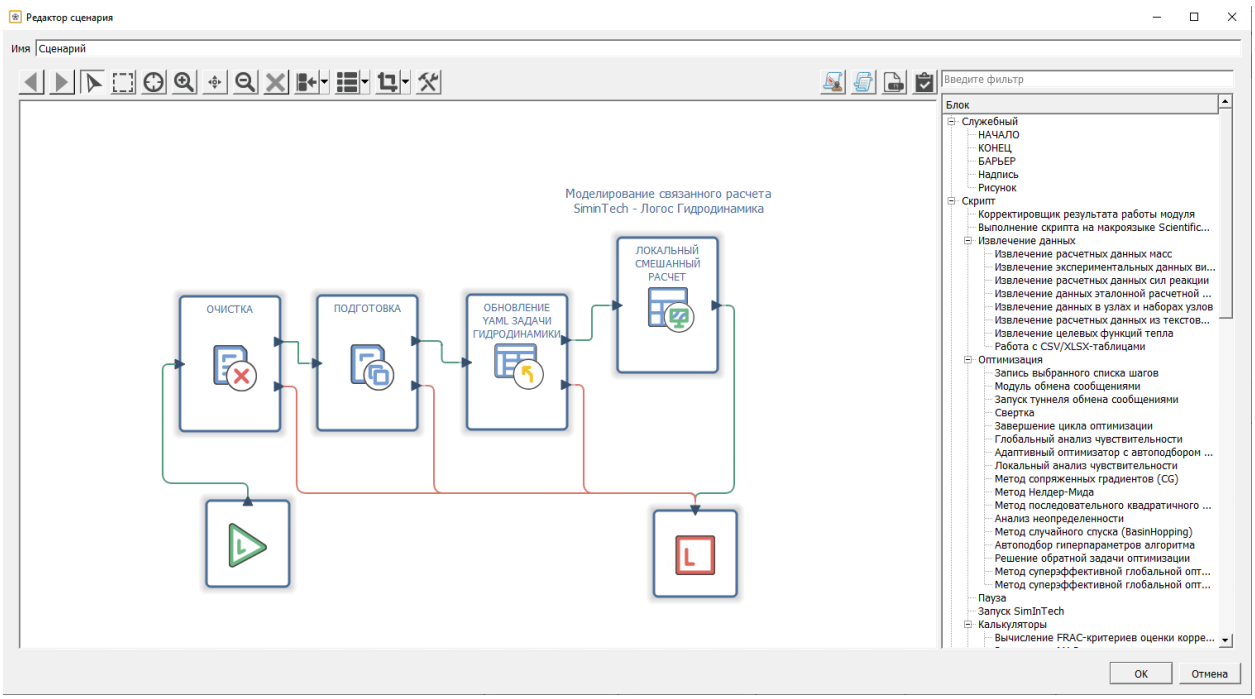


Рисунок 22 – Сценарий связанного расчета

Результаты моделирования

На рисунке 23 представлен фрагмент лога обменных данных (значений момента и частот вращения) на конечных шагах моделирования.

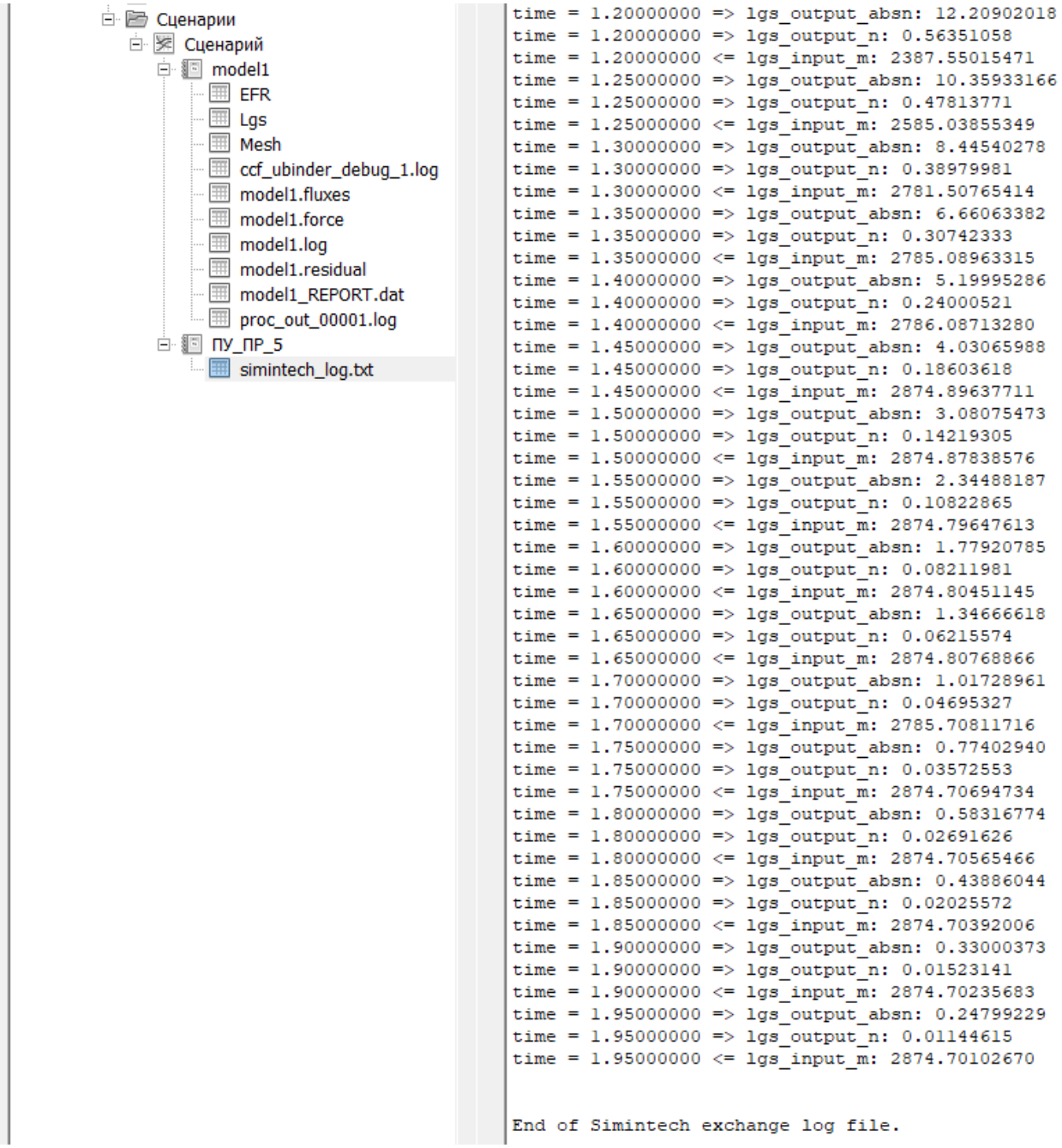


Рисунок 23 – Фрагмент лога обменных данных

На рисунке 24 представлен фрагмент результирующей CSV-таблицы, содержащей следующие данные: «N» (частота вращения), «G» (массовый расход), «M» (момент), dP (перепад давления).

	A	B	C	D
1	N	G	M	dP
2	0.24799229279841362	400.0	3930.8664938089105	300007.6271816218
3	0.24799229279841362	402.8112449799197	3930.9629406523873	300012.0787817773
4	0.24799229279841362	405.62248995983936	3931.059522046681	300016.53661417327
5	0.24799229279841362	408.43373493975906	3931.1562362927725	300021.0006003215
6	0.24799229279841362	411.2449799196787	3931.2530816839	300025.470661376
7	0.24799229279841362	414.0562248995984	3931.350056505665	300029.9467181382
8	0.24799229279841362	416.86746987951807	3931.4471590361222	300034.4286910601
9	0.24799229279841362	419.6787148594378	3931.544387545878	300038.91650025017
10	0.24799229279841362	422.4899598393574	3931.641740298195	300043.41006547713
11	0.24799229279841362	425.30120481927713	3931.739215549084	300047.90930617484
12	0.24799229279841362	428.1124497991968	3931.836811547409	300052.4141414467
13	0.24799229279841362	430.9236947791165	3931.9345265349884	300056.9244900707
14	0.24799229279841362	433.73493975903614	3932.0323587467005	300061.4402705041
15	0.24799229279841362	436.54618473895584	3932.1303064105787	300065.96140088775

Рисунок 24 – CSV-таблица с результатами интерполяции данных редуцированной модели