



«APM FGA»

Fluid and Gas Analysis

Анализ течений жидкостей и газов

РУКОВОДСТВО ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

APM FGA

Система анализа течений жидкостей и газов

Руководство Пользователя

Версия V16

Научно-технический центр «Автоматизированное Проектирование Машин»

141070, Россия, Московская область, г. Королёв, Октябрьский бульвар 14, оф. 6

тел./факс: +7 (498) 600-25-10, +7 (495) 514-84-19.

Наш адрес в Интернете: <http://www.apm.ru>, e-mail: com@apm.ru

Авторские права © 1989 – 2018 Научно-технический центр «Автоматизированное проектирование машин». Все права защищены. Все программные продукты НТЦ «АПМ» являются зарегистрированными торговыми марками центра. Названия и марки, упомянутые в данном руководстве, являются зарегистрированными торговыми марками их законных владельцев.

Содержание

Релиз APM FGA V14	4
Релиз APM FGA V15	5
Релиз APM FGA V16	6
Введение	7
Интерфейс	8
Активация интерфейса	8
APM Studio	8
APM Structure3D	8
Свойства течений и сред течений	8
APM Studio	9
APM Structure3D	10
Граничные и начальные условия	12
APM Studio	13
APM Structure3D	14
Параметры анализа	15
Вкладка Решатели СЛАУ	15
Вкладка Алгоритм.....	17
Вкладка Параметры сходимости	18
Вкладка Стабилизация сходимости	19
Вкладка Нестационарные опции.....	20
Вкладка Модели турбулентности.....	21
Вкладка Относительные условия	21
Вкладка Результаты.....	22
Запуск анализа	23
APM Studio	23
APM Structure3D	24
Результаты анализа	24
Учет результатов анализа течений Навье-Стокса в расчете НДС	27
Краткие теоретические сведения	29
Потенциальные течения	29
Фильтрация течений	29
Течения Навье-Стокса	30
Непрерывная постановка	30
Конечно-элементная постановка	32

Релиз APM FGA V14

1. Реализован анализ потенциальных течений, который позволяет рассчитывать поля скоростей и давлений идеальных течений (несжимаемых, изотермических, невязких).
2. Реализован анализ фильтрации течений в стационарной и нестационарной постановках для расчета полей давлений и скоростей течений через ортотропную пористую среду.
3. Реализован анализ течений Навье-Стокса для расчета полей давлений и скоростей вязких течений. Реализован в стационарной, несжимаемой, изотермической постановке с возможностью учета турбулизации потока в соответствии с алгебраической моделью турбулентности, основанной на гипотезе пути смешения Прандтля.

Релиз APM FGA V15

1. Реализованы термические течения, включая следующие процессы теплообмена:
 - теплопроводность,
 - конвективный теплообмен: адвективный перенос, вынужденная и свободная конвекция,
 - теплообмен излучением,
 - теплообмен смешанного типа.
2. Реализован алгоритм для моделирования процессов сопряженного теплообмена, основанный на взаимодействии полей температур на границах раздела агрегатных состояний жидкость/газ - твердое тело.
3. Реализован пользовательский интерфейс APM FGA на базе APM Structure3D.

Релиз APM FGA V16

1. Реализовано граничное условие "Расход", которое представлено в вариантах "объемного расхода" или "массового расхода" и может быть задано на поверхности в виде удельных или суммарных величин.

2. Реализован функционал "Подвижная стенка" в граничном условии "Скорость".

3. Добавлена возможность задания "нормальных/относительных условий".

4. Реализована возможность отрисовки векторных карт на узлах модели.

5. Ускорена процедура генерации граничных условий в APM Studio.

6. Реализован функционал для работы с результатами, в том числе и в процессе расчета; в частности, реализована возможность учета ранее полученных результатов в качестве исходных для вновь проводимого анализа течений Навье-Стокса.

7. Реализован расчет напряженно-деформированного состояния для твердых тел с использованием ранее полученных результатов анализа течений Навье-Стокса (полей давлений и/или температур) в качестве нагрузок.

Введение

Средства анализа течений жидкостей и газов, реализованные в АРМ FGA, могут использоваться для моделирования процессов различных течений.

Доступны три типа анализа:

- анализ потенциальных течений; используется для расчета полей скоростей и давлений идеальных течений;
- анализ фильтрации течений; используется для расчета полей давлений и скоростей течений через ортотропную пористую среду; реализован в стационарной и нестационарной постановках;
- анализ течений Навье-Стокса; используется для расчета полей давлений и скоростей течений в ламинарной и турбулентной постановках.

Используемая в АРМ FGA конечно-элементная формулировка для каждого из типов анализа основана на базовых законах сохранения. Поддерживаемые типы конечных элементов - solid элементы первого порядка:

- 4-х узловой тетраэдр,
- 5-и узловая пирамида,
- 6-и узловая призма,
- 8-и узловой гексаэдр.

Результатами каждого из типов анализа являются:

- поля давлений (контурные карты),
- поля скоростей (контурные и векторные карты).

Интерфейс

Активация интерфейса

APM Studio

Для активации элементов интерфейса системы анализа течений жидкостей и газов APM FGA, построенной на базе APM Studio, нужно вызвать диалоговое окно с помощью меню *Инструменты / Свойства приложения...* и на вкладке *Виды КЭ-анализа* установить опцию *Анализ течений жидкостей и газов (FGA)*. При активации станут доступными меню *FGA* и панель инструментов *FGA ГУ/НУ*.

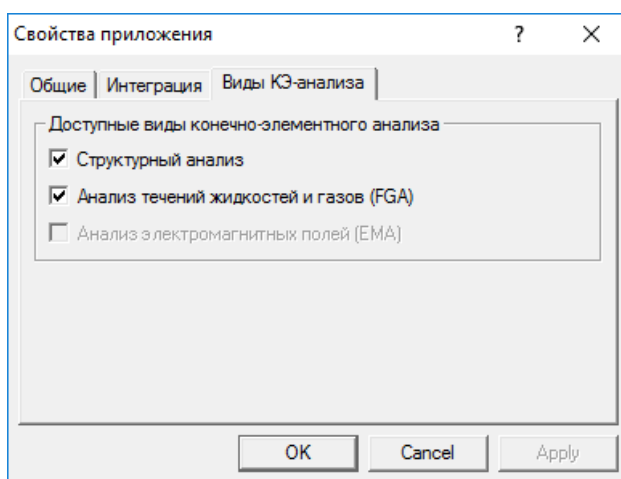


Рисунок 1 - Диалоговое окно *Свойства приложения* (вкладка *Виды КЭ-анализа*)

APM Structure3D

Все команды пользовательского интерфейса APM FGA, необходимые для задания свойств материалов, начальных и граничных условий, запуска анализа, находятся в дереве программы. Дерево программы по умолчанию не активно. Для его активации необходимо запустить две панели инструментов *Объекты* и *Свойства*.

Свойства течений и сред течений

Для анализа течений необходимо задать соответствующий набор свойств течений и сред течений в зависимости от типа проводимого анализа.


Свойствами течений для различных анализов могут являться: плотность, вязкость, теплопроводность, удельная теплоемкость, проницаемость среды, модуль упругости среды.

Свойства течений и сред течений могут быть заданы в виде *постоянного значения*, *графика*, *таблицы* или *функции* переменных в зависимости от типа постановки задачи.

Таблица 1 - Свойства течений

свойство	единица измерения	способ задания	доступные независимые переменные - аргументы
Плотность (DENS)	кг/м ³	постоянное значение, график, таблица, функция	координаты x, y, z, статическое давление (PRES), полное давление (TOTPRES), температура (TEMP)
Вязкость (VISC)	Па*с		координаты x, y, z, статическое давление (PRES), полное давление (TOTPRES), температура (TEMP)
Удельная теплоемкость (SPHT)	Дж/(кг*К)		координаты x, y, z, температура (TEMP)
Теплопроводность (COND)	Вт/(м*К)		координаты x, y, z, температура (TEMP)
Проницаемость среды	м/с		координаты x, y, z
Модуль упругости среды	Па		координаты x, y, z

APM Studio

Выбор свойств доступен из диалогового окна *Материал*, которое можно вызвать, нажав кнопку  на панели инструментов *Управление*.

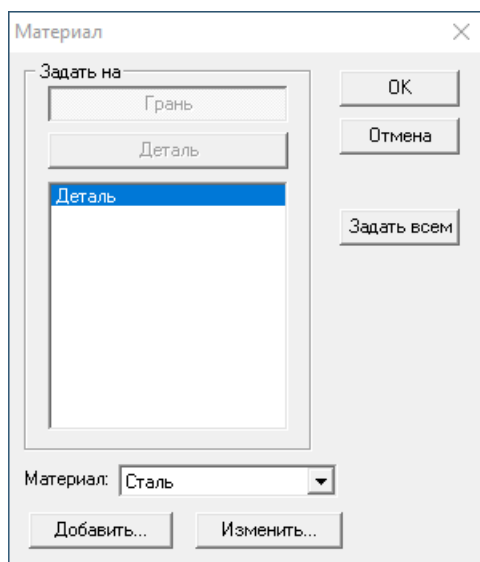


Рисунок 2 - Диалоговое окно *Материал*

В диалоговом окне *Материал* можно как создать новый материал (кнопка *Добавить...*), так и отредактировать существующий (кнопка *Изменить...*), любой из ранее созданных материалов можно выбрать из ниспадающего списка *Материал*, в котором представлены имена всех существующих в проекте материалов. После нажатия кнопки *Добавить...* или кнопки *Изменить...* откроется диалоговое окно *Параметры материала*,

в котором по кнопке *Дополнительные свойства* появится диалог *Дополнительные свойства материала*.

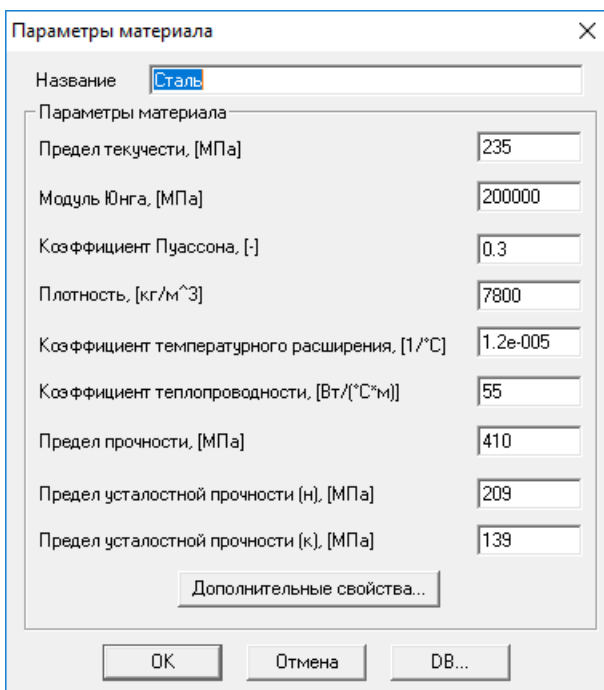


Рисунок 3 - Диалоговое окно *Параметры материала*

В появившемся диалоговом окне *Дополнительные свойства материала* свойства FGA становятся доступными для задания или редактирования с использованием *дерева дополнительных свойств*.

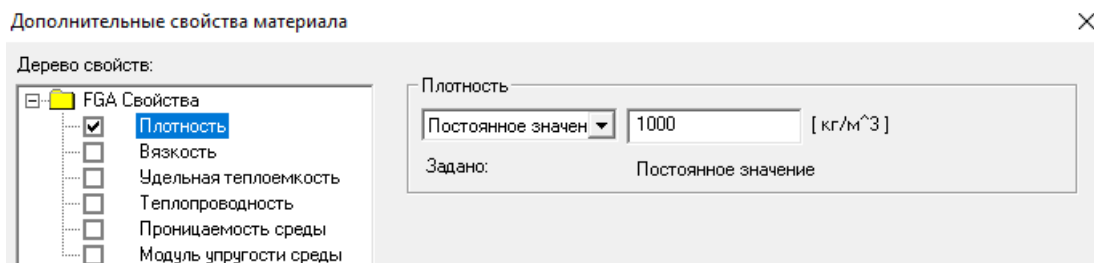


Рисунок 4 - Диалоговое окно *Дополнительные свойства материала*

Чтобы активировать свойства для задания нужно установить галочку соответствующего свойства.

APM Structure3D

Выбор данных свойств доступен:

- из диалогового окна *Свойства/Материалы...*;
- в дереве *Объекты* выбрать пункт *Материалы*, выбрать необходимый материал и нажать в контекстном меню кнопку *Изменить* или вызвав контекстное меню в пункте *Материалы* выбрать кнопку *Добавить*.

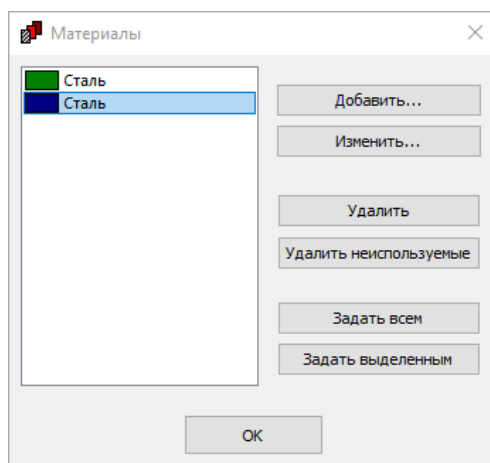


Рисунок 5 - Диалоговое окно *Материал*

В диалоговом окне *Материал* можно как создать новый материал (кнопка *Добавить...*), так и отредактировать существующий (кнопка *Изменить...*), любой из ранее созданных материалов можно выбрать из списка в диалоговом окне *Материал*, в котором представлены имена всех существующих в проекте материалов. После нажатия кнопки *Добавить...* или кнопки *Изменить...* откроется диалоговое окно *Выбор свойств материала*, в котором находятся *Текущие* и *Доступные* свойства материала. Перенеся набор свойств *Течение* в *Текущие* свойства появится диалог *Дополнительные свойства материала*.

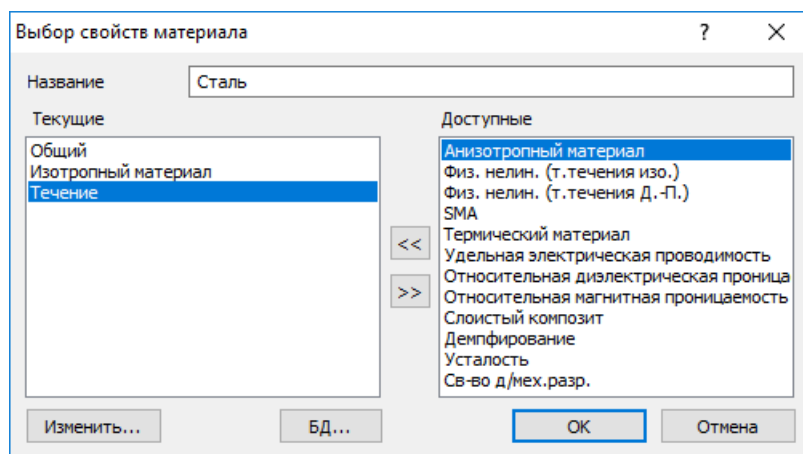


Рисунок 6 - Диалоговое окно *Выбор свойств Материала*

В появившемся диалоговом окне *Дополнительные свойства материала* задаются различные свойства течения. Свойства FGA становятся доступными для задания или редактирования с использованием *дерева* дополнительных свойств.

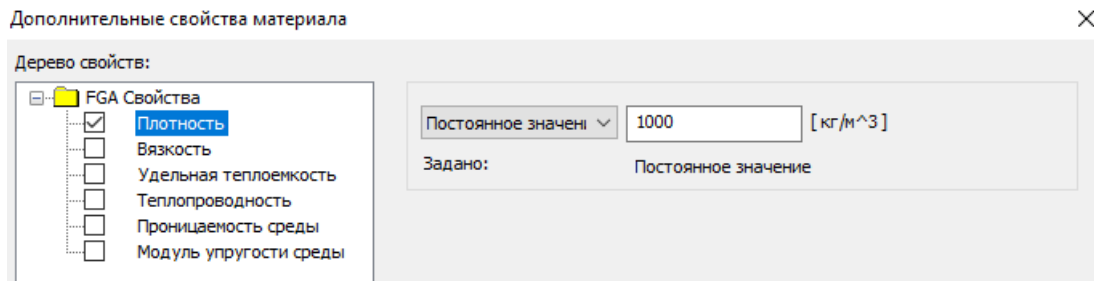


Рисунок 7 - Диалоговое окно *Дополнительные свойства материала*

Чтобы активировать свойства для задания нужно установить галочку соответствующего свойства.

Свойства FGA могут быть заданы в виде *постоянного значения, графика, таблицы* или *функции* переменных x , y , z , в зависимости от типа постановки задачи. Например, для нестационарного анализа фильтрации течений необходимо задание свойств: *плотность, проницаемость среды, модуль упругости среды*. Среда в общем случае представляется ортотропной, поэтому для моделирования течения в изотропной среде необходимо задать все три главных компоненты тензора проницаемости одинаковыми *постоянными значениями*.

Граничные и начальные условия

Граничными и начальными условиями для различных анализов течений являются:

- скорость (границы объемных элементов);
- давление (границы объемных элементов);
- расход (границы объемных элементов);
- ускорение (объемные элементы);
- потенциал скорости (границы объемных элементов);
- начальное давление (объемные элементы);
- температура (границы объемных элементов);
- тепловой поток (границы объемных элементов);
- тепловая конвекция (границы объемных элементов);
- тепловая радиация (границы объемных элементов).

Граничные и начальные условия FGA могут быть заданы в виде *постоянного значения, графика, таблицы* или *функции* переменных в зависимости от типа постановки задачи.

Таблица 2 - ГУ/НУ течений

ГУ/НУ	единица измерения	способ задания	доступные независимые переменные - аргументы
Скорость (VELX, VELY, VELZ)	м/с	постоянное значение, график, таблица, функция	координаты x , y , z
Давление (PRES)	Па		координаты x , y , z
Расход (FR)			координаты x , y , z

- удельный объемный - удельный массовый - суммарный объемный - суммарный массовый	м/с кг/(м ² *с) м ³ /с кг/с		
Ускорение (ACCELX, ACCELY, ACCELZ)	м/с ²		координаты x, y, z
Температура (TEMP)	К		координаты x, y, z
Тепловой поток (HF)	Вт/м ²		координаты x, y, z, температура (TEMP)
Тепловая конвекция (HC) - коэффициент теплоотдачи - температура окруж. среды	Вт/(м ² *К) К		координаты x, y, z, температура (TEMP)
Тепловая радиация (HR) - степень черноты - температура окруж. среды	- К		координаты x, y, z, температура (TEMP)

APM Studio

Граничные и начальные условия доступны на панели инструментов *FGA ГУ/НУ*.



Рисунок 8 - Панель инструментов *FGA ГУ/НУ*

Рассмотрим задание ГУ на примере *скорости течения*.

Рисунок 9 - Диалоговое окно *Скорость течения*

Тип граничного условия определяется автоматически в зависимости от заданных компонент вектора:

- если необходимо задать граничное условие в виде потока через поверхность модели (вход, выход), все компоненты вектора скорости течения должны быть заданы и хотя бы одна из них ненулевая.

- если необходимо задать граничное условие потока на стенке модели (слипание), все компоненты вектора скорости течения должны быть заданы нулевыми постоянными значениями.

- если необходимо задать граничное условие течения в виде условия симметрии, задаются одна или две компоненты нулевыми значениями, оставшиеся вычисляются в процессе анализа.

APM Structure3D

Граничные и начальные условия доступны в дереве программы (панель инструментов *Объекты/Нагрузки/FGA ГУ/НУ*).

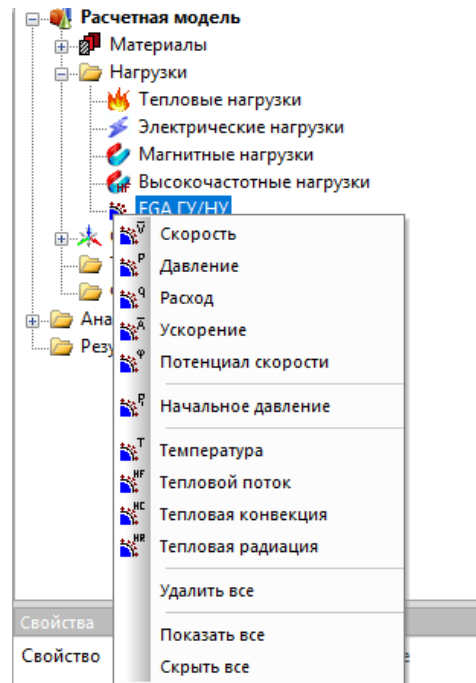


Рисунок 10 - Граничные и начальные условия

Рассмотрим задание ГУ на примере *скорости течения*.

Для определения поверхности, на которой будет задана скорость, необходимо выделить объемные элементы и соответствующие узлы объемных элементов, совокупно описывающие эту поверхность, и нажать *Применить*.

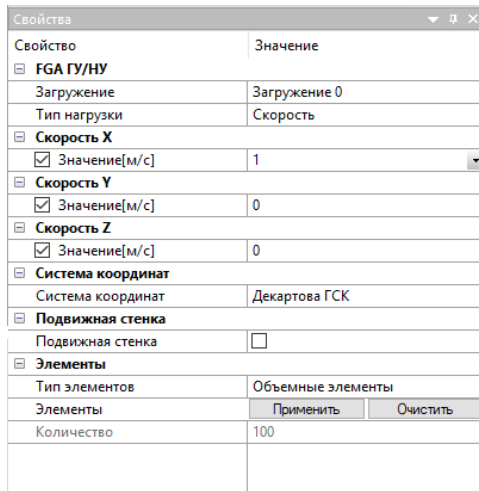


Рисунок 11 - Скорость течения в панели инструментов Свойства

Параметры анализа

Для задания параметров анализа необходимо:

- в APM Studio выбрать команду *FGA/Параметры расчета...*
- в APM Structure3D в дереве *Анализ/FGA* выбрать тип анализа и нажать кнопку *Редактировать* параметры анализа.

Диалоговое окно *Параметры анализа* содержит в себе 8 вкладок:

- решатели СЛАУ;
- алгоритм;
- параметры сходимости;
- стабилизация сходимости;
- нестационарные опции;
- модели турбулентности;
- относительные условия;
- результаты.

Вкладка Решатели СЛАУ

Вкладка решатели СЛАУ содержит четыре основные группы СЛАУ:

- параметры решения СЛАУ;
- параметры решения СЛАУ движения;
- параметры решения СЛАУ энергии;
- параметры решения СЛАУ турбулентности.

Группа *Параметры решения СЛАУ* доступна всегда. В данной группе выбирается метод решения СЛАУ и необходимые настройки для выбранного метода.

Методы решения общего СЛАУ:

Sparse_CG_DP – итерационный метод решения СЛАУ – метод сопряженных градиентов с использованием диагонального предобуславливателя. Для данного метода

настраиваемыми параметрами являются *точность решения СЛАУ* и *максимальное количество итераций для решения СЛАУ*.

Sparse_BiCGs_DP – итерационный метод решения СЛАУ – стабилизированный метод бисопряженных градиентов с использованием диагонального предобуславливателя. Для данного метода настраиваемыми параметрами являются *точность решения СЛАУ* и *максимальное количество итераций для решения СЛАУ*.

Sparse_BiCGs_ILUT – итерационный метод решения СЛАУ – стабилизированный метод бисопряженных градиентов с использованием неполного LU разложения. Для данного метода настраиваемыми параметрами являются *точность решения СЛАУ* и *максимальное количество итераций для решения СЛАУ*.

Sparse LU – прямой метод решения СЛАУ, основанный на разложениях матриц, в зависимости от их типа. По умолчанию используется разложение LU для несимметричной матрицы. Опция *Использовать масштабные векторы* улучшает диагонализацию матрицы и предназначена для решения СЛАУ с плохо обусловленными матрицами.

MinRes – итерационный метод решения для СЛАУ с симметричной положительно неопределенной матрицей. Для данного метода настраиваемыми параметрами являются *точность решения СЛАУ* и *максимальное количество итераций для решения СЛАУ*.

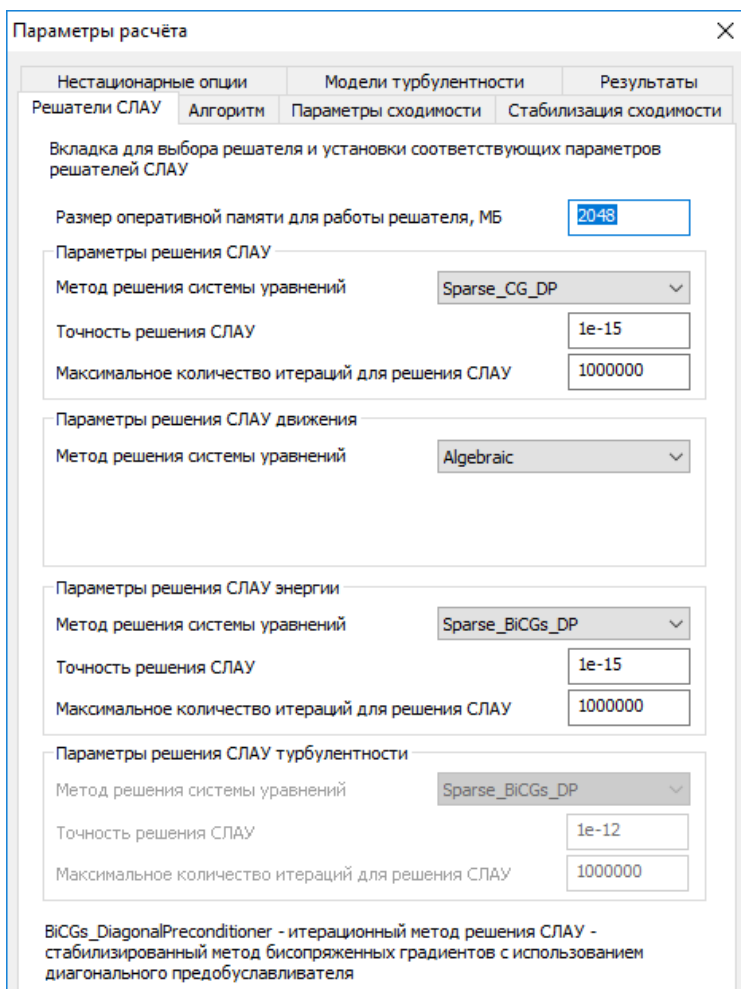


Рисунок 12 - Диалоговое окно *Параметры расчета* (вкладка *Решатель СЛАУ*)

Группа *Параметры решения СЛАУ движения* доступна всегда. Для данной группы используется только алгебраический метод решения системы уравнений.

Группа *Параметры решения СЛАУ энергии* доступна для термических постановок задач. В данной группе выбирается метод решения и необходимые настройки для выбранного метода.

Группа *Параметры решения СЛАУ турбулентности* доступна для турбулентных постановок задач. В данной группе выбирается метод решения и необходимые настройки для выбранного метода.

Вкладка Алгоритм

Данная вкладка предназначена для выбора *алгоритма* и *постановки задачи* Навье-Стокса для однофазного течения. Данная вкладка содержит три основные группы:

- *алгоритм решения*;
- *постановка задачи*;
- *алгоритм учета адвекции*.

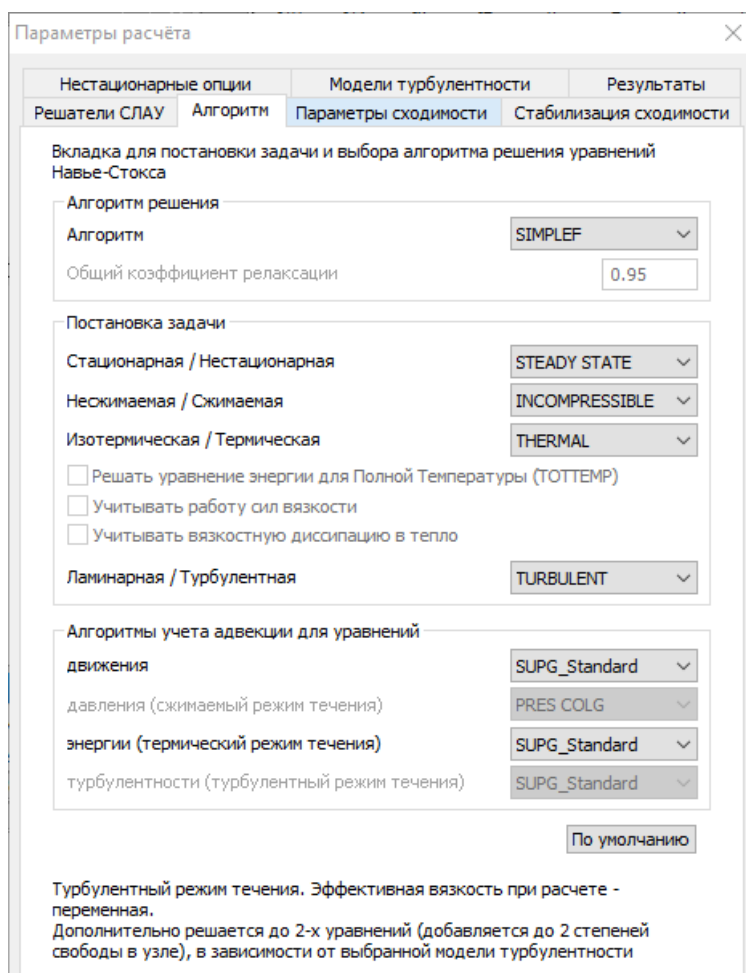


Рисунок 13 - Диалоговое окно *Параметры расчета* (вкладка *Алгоритм*)

Алгоритм решения *SIMPLEF* - Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations - итерационный алгоритм, основанный на раздельном решении уравнений, расщепляемых по физическим процессам и степеням свободы. Решаемые с помощью данного алгоритма задачи могут иметь различное число степеней свободы, в зависимости от их постановок.

Постановка задачи содержит набор различных постановок задач, определяющих в том числе и количество степеней свободы:

- *Стационарная / Нестационарная,*
- *Несжимаемая / Сжимаемая,*
- *Изотермическая / Термическая,*
- *Ламинарная / Турбулентная,*
- их комбинации.

На данный момент доступен стационарный режим течения (*STEADY STATE*) с постоянной плотностью (*INCOMPRESSIBLE*).

Для *Изотермической, Ламинарной* постановки задачи общее число степеней свободы равно четырем: V_x, V_y, V_z, P .

Турбулентная постановка задачи может добавлять N степеней свободы в узле КЭ сетки в зависимости от выбранной модели турбулентности.

Термическая постановка задачи добавит 1 степень свободы в узле КЭ сетки - температуру.

Алгоритмы учета адвекции для уравнений содержит выбор различных алгоритмов для уравнений движения и энергии (термический режим):

SUPG_Standard – Streamline Petrov-Galerkin (SUPG) approach – метод учета адвективных членов в уравнениях движения со стандартным (Standard) сглаживанием разрывных функций;

SUPG_Shakhib – Streamline Petrov-Galerkin (SUPG) approach – метод учета адвективных членов в уравнениях движения со сглаживанием Шахиба (Shakhib) разрывных функций.

Вкладка Параметры сходимости

Для критериев сходимости по каждой из степеней свободы задаются максимально допустимые значения относительных погрешностей между итерациями. Также задается *максимальное количество итераций* для алгоритма расчета.

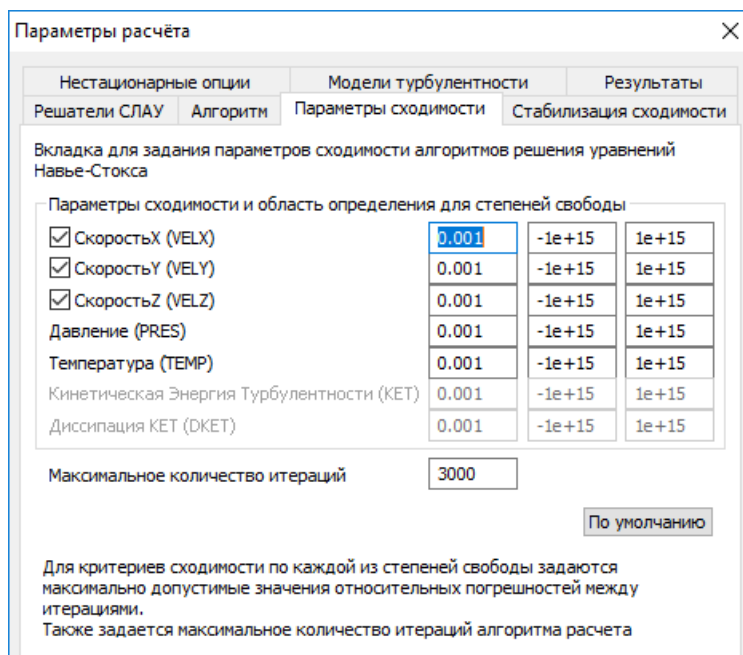


Рисунок 14 - Диалоговое окно *Параметры расчета* (вкладка *Параметры сходимости*)

Если в процессе расчета сходимость не достигнута (превышено максимальное количество итераций), то в появившемся диалоговом окне предусмотрена возможность увеличения числа итераций на 10% от заданного максимального значения.

При достижении максимального числа итераций результаты последней сохраняются. Эти результаты можно использовать в качестве начальных при перезапуске задачи на расчет (например, если достигнуто максимальное число итераций и не удовлетворены критерии сходимости; или же просто для достижения лучшей точности решения задачи).

Вкладка Стабилизация сходимости

Вкладка предназначена для задания параметров стабилизации сходимости алгоритмов решения уравнений Навье-Стокса.

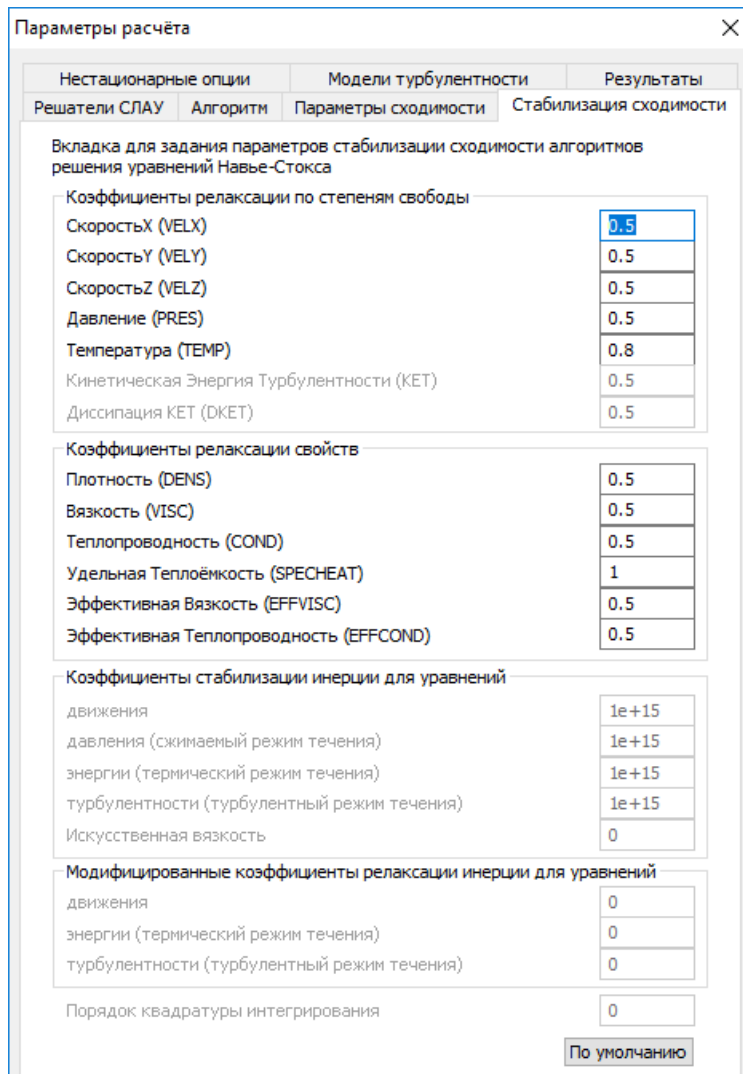


Рисунок 15 - Диалоговое окно *Параметры расчета* (вкладка *Стабилизация Сходимости*)

Вкладка **Нестационарные опции**

Данная вкладка содержит параметры нестационарных постановок задач.

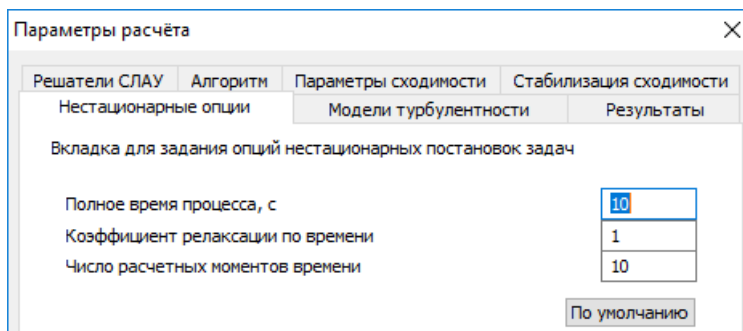


Рисунок 16 - Диалоговое окно *Параметры расчета* (вкладка *Нестационарные опции*)

Вкладка Модели турбулентности

Данная вкладка содержит настраиваемые опции турбулентности, в зависимости от выбранной модели турбулентности для турбулентной постановки задачи.

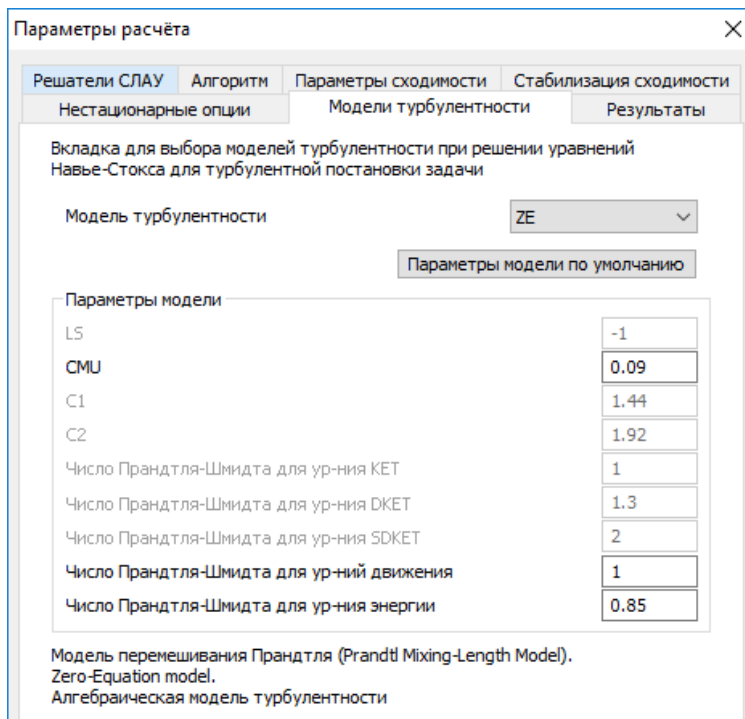


Рисунок 17 - Диалоговое окно *Параметры расчета* (вкладка *Модели турбулентности*)

CMU – безразмерный коэффициент, используется для вычисления турбулентной вязкости, а так же для формирования векторов правых частей уравнений турбулентности.

Число Прандтля-Шмидта для уравнений движения – безразмерный коэффициент диффузионных членов уравнений движения.

Число Прандтля-Шмидта для уравнения энергии – безразмерный коэффициент диффузионных членов уравнения энергии.

Вкладка Относительные условия

Данная вкладка содержит набор относительных/номинальных/нормальных условий, которые могут быть использованы в зависимости от постановки задачи при решении уравнений Навье-Стокса.

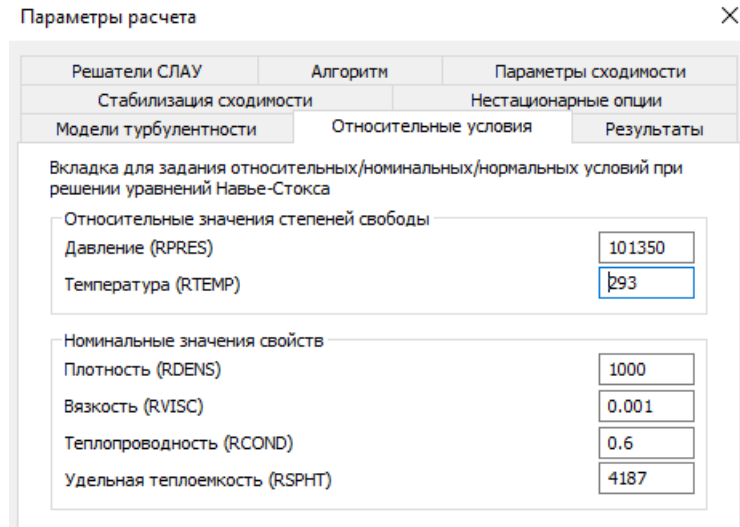


Рисунок 18 - Диалоговое окно *Параметры расчета* (вкладка *Относительные условия*)

Вкладка Результаты

Данная вкладка содержит набор выводимых дополнительных результатов расчета. Пользователь перед началом расчета должен выбрать, необходимые ему результаты расчета. Основные результаты анализа, такие как поля давлений и скоростей, после расчета доступны всегда. Дополнительные же результаты анализа можно по желанию вычислять или не вычислять, сохранять или не сохранять в процессе расчета.

Также существует возможность *сохранять* или не сохранять результаты промежуточных *итераций в процессе расчета*, например, при заданном параметре равном 3, будет сохранена каждая 3 итерация с результатами в процессе расчета, а также финальная по завершении расчета.

Опция *использовать доступные результаты в качестве исходных* позволяет использовать доступный для данной модели набор результатов посредством выбора *Загрузка, Момент времени, Итерация* в качестве исходного (начального приближения) для вновь запускаемого анализа. Данная опция позволяет быстрее достигнуть сходимости задачи в случаях, например, увеличения точности расчета, изменения свойств или граничных условий задачи, или же изменения постановки задачи.

Опция *Удалить доступные результаты* позволяет удалить все доступные для данной модели результаты перед запуском анализа.

Создать лог файл – позволяет создать вкладку лог FGA монитора и текстовый файл *.frmlog или *.ssalog, где в зависимости от уровня логирования выводится соответствующая текстовая информация по расчету и модели:

Log Level 0 – позволяет вывести общую информацию о постановке задачи, параметрах алгоритмов и решателей, а так же информацию о решении задачи на каждой итерации и общем времени решения задачи.

Log Level 1 – дополнительно к информации, содержащейся в *Log Level 0* выводятся решения задачи для каждой степени свободы в каждом узле для финальной итерации.

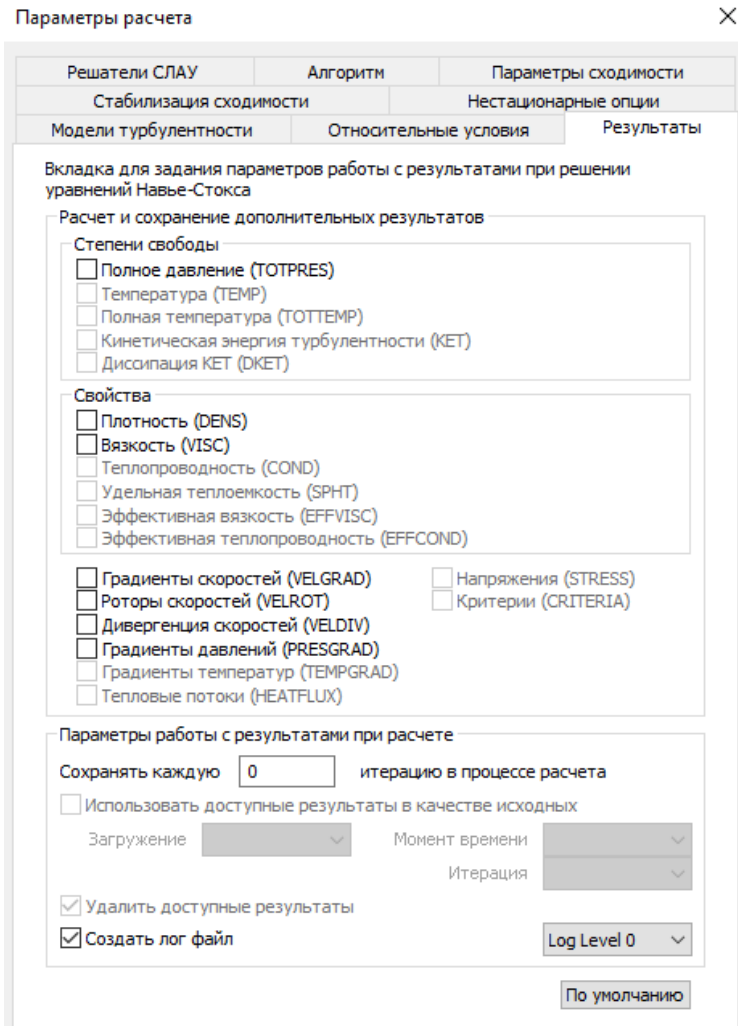


Рисунок 19 - Диалоговое окно *Параметры расчета* (вкладка *Результаты*)

Запуск анализа

APM Studio

Для запуска анализа в APM Studio необходимо выбрать команду *FGA/Расчет...* и выбрать *тип анализа*.

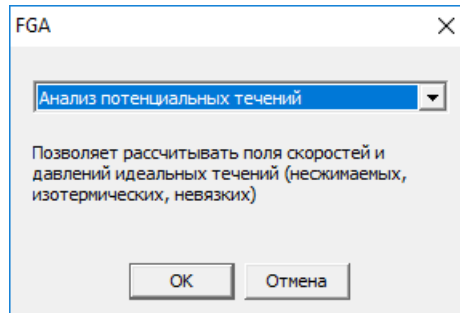


Рисунок 20 - Диалоговое окно *тип анализа*

APM Structure3D

Для запуска анализа в APM Structure3D необходимо в дереве *Анализ/FGA* и выбрать команду *тип анализа*.

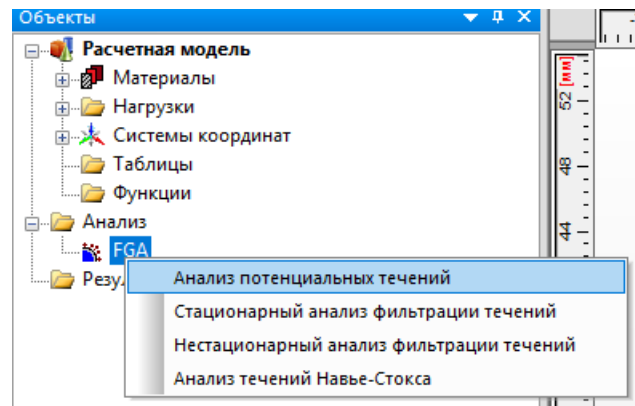


Рисунок 21 - Выбор *типа анализа*

Результаты анализа

Для просмотра карт результатов анализа необходимо выбрать команду *Результаты/Карта результатов...*

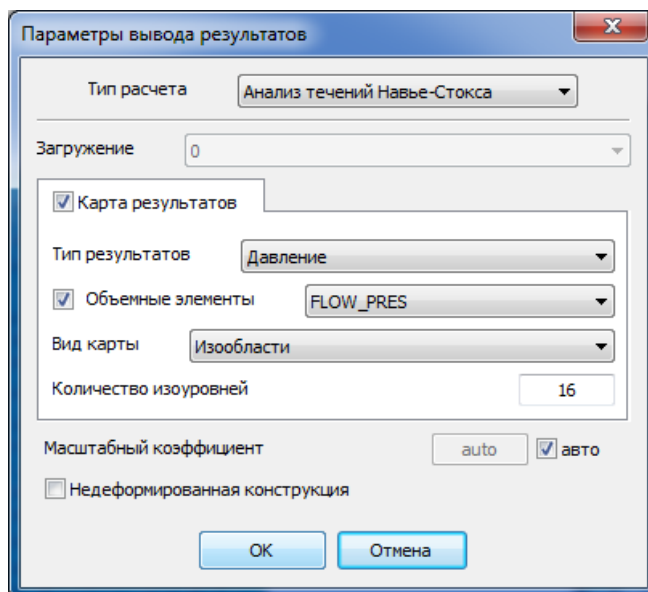


Рисунок 22 - Диалоговое окно *Параметры вывода результатов*

В группе *Тип результата* формируется список рассчитанных результатов. В группе *объемные элементы* формируется список доступных результатов, в зависимости от выбранного типа. Доступность результатов так же определяется выбранными пунктами в *Параметры расчета/Результаты*.

Таблица 3 - Результаты анализа течений

Тип результата	Подтип результата (объемные элементы)		Доступность результатов (Параметры расчета\Результаты)
Давление	FLOW_PRES	Давление	всегда
	FLOW_TOTPRES	Полное давление	Полное давление (TOTPRES)
Скорость (контурная/ векторная)	FLOW_VELX	Скорость X	всегда
	FLOW_VELY	Скорость Y	
	FLOW_VELZ	Скорость Z	
	FLOW_VELSUM	Скорость SUM	
Температура	FLOW_TEMP	Температура	Температура (TEMP)
Свойства	FLOW_DENS	Плотность	Плотность (DENS)
	FLOW_VISC	Вязкость	Вязкость (VISC)
	FLOW_COND	Теплопроводность	Теплопроводность (COND)
	FLOW_SPECHEAT	Удельная теплоемкость	Удельная теплоемкость (SPHT)
	FLOW_EFFVISC	Эффективная вязкость	Эффективная вязкость (EFFVISC)
	FLOW_EFFCOND	Эффективная теплопроводность	Эффективная теплопроводность

			(EFFCOND)
Градиент давлений (контурная/векторная)	FLOW_PRESGRADX	по оси X	Градиент давлений (PRESGRAD)
	FLOW_PRESGRADY	по оси Y	
	FLOW_PRESGRADZ	по оси Z	
	FLOW_PRESGRADSUM	SUM	
Градиент скорости X (контурная/векторная)	FLOW_VELXGRADX	по оси X	Градиент скорости (VELGRAD)
	FLOW_VELXGRADY	по оси Y	
	FLOW_VELXGRADZ	по оси Z	
	FLOW_VELXGRADSUM	SUM	
Градиент скорости Y (контурная/векторная)	FLOW_VELYGRADX	по оси X	
	FLOW_VELYGRADY	по оси Y	
	FLOW_VELYGRADZ	по оси Z	
	FLOW_VELYGRADSUM	SUM	
Градиент скорости Z (контурная/векторная)	FLOW_VELZGRADX	по оси X	
	FLOW_VELZGRADY	по оси Y	
	FLOW_VELZGRADZ	по оси Z	
	FLOW_VELZGRADSUM	SUM	
Ротор скорости (контурная/векторная)	FLOW_VELROTX	по оси X	Ротор скорости (VELROT)
	FLOW_VELROTY	по оси Y	
	FLOW_VELROTZ	по оси Z	
	FLOW_VELROTSUM	SUM	
Дивергенция скорости	FLOW_VELDIV		Дивергенция скорости (VELDIV)
Градиент температуры (контурная/векторная)	FLOW_TEMPGRADX	по оси X	Градиент температуры (TEMPGRAD)
	FLOW_TEMPGRADY	по оси Y	
	FLOW_TEMPGRADZ	по оси Z	
	FLOW_TEMPGRADSUM	SUM	
Тепловые потоки (контурная/векторная)	FLOW_HEATFLUXX	по оси X	Тепловые потоки (HEATFLUX)
	FLOW_HEATFLUXY	по оси Y	
	FLOW_HEATFLUXZ	по оси Z	
	FLOW_HEATFLUXSUM	SUM	

Для просмотра анимации карт результатов анализа необходимо выбрать команду *Результаты/Карта результатов...* и в диалоговом окне *Параметры вывода результатов* переключиться на вкладку *Анимация*.

При визуализации результатов расчета для удобства анализа можно воспользоваться диалогом *Параметры отображения*.

В диалоге *Параметры отображения* можно:

- установить необходимую *глубину просмотра*;
- *установить плоскость разреза*, по которой будет отображаться глубина просмотра;
- установить *диапазон результатов* посредством шкалы или введения значений. При

совмещении ползунков выводится одна изоповерхность, соответствующая конкретному значению. Совмещённые ползунки можно перемещать заедно. При этом одна изоповерхность будет перестраиваться;

- вкл./выкл. отображение элементов на модели *до, внутри* и *за* пределами выставленного в *диапазоне результатов*;
- при установке галочки *Перерасчет цвета* будет произведена перерисовка карты результатов в соответствии с выставленным диапазоном результатов;
- построения карты результатов в виде изолиний.

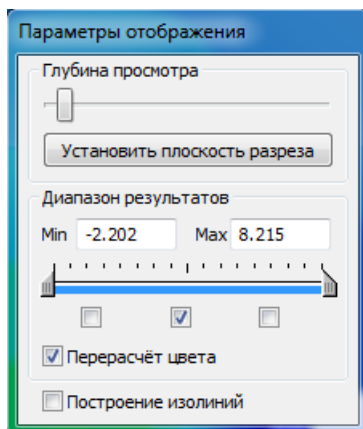


Рисунок 23 - Диалог *Параметры отображения*

Учет результатов анализа течений Навье-Стокса в расчете НДС

Для учета полей давлений и/или температур, являющихся доступными для данной модели результатами анализа течений Навье-Стокса, в качестве исходных нагрузок при расчете напряженно-деформированных состояний твердых тел при запуске линейного статического расчета необходимо указать этот доступный набор результатов посредством выбора *Загружение, Момент времени, Итерация*.

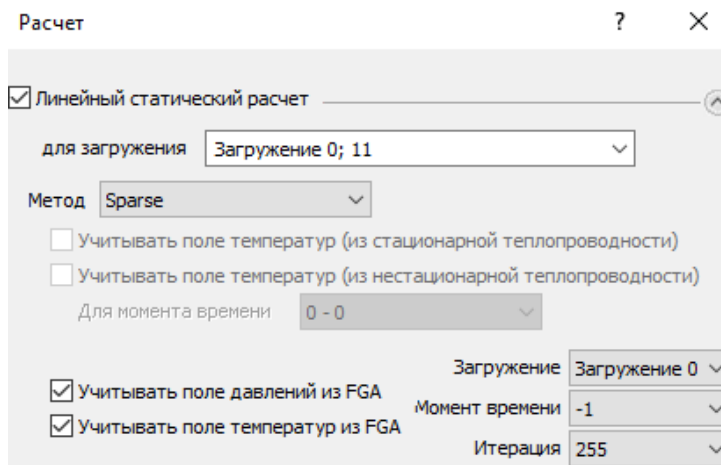


Рисунок 24 - Диалог *Расчет*
(учет результатов *анализа течений Навье-Стокса*)

При выборе *Загружения*, из которого будут взяты результаты анализа течений Навье-Стокса для расчета НДС, рекомендуется следующее:

- не добавлять статических нагрузок в данное *загружение*, чтобы при анализе результатов НДС оценить влияние только полей давлений и/или температур на конструкцию;

- остальные нагрузки, приложенные к конструкции задавать отдельными загружениями, а их сочетание учесть с помощью *комбинаций загружений*.

Краткие теоретические сведения

Потенциальные течения

Основные допущения для течения:

- стационарное,
- несжимаемое,
- изотермическое,
- невязкое.

Основное уравнение:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0,$$

где φ - скалярный потенциал скорости течения.

Компоненты вектора скорости течения:

$$V_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad V_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad V_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z}.$$

Скорость течения:

$$\bar{V} = \bar{V}_x + \bar{V}_y + \bar{V}_z, \quad V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}.$$

Давление вычисляется из уравнения Бернулли (закона сохранения энергии):

$$\frac{\rho V^2}{2} + P = const,$$

где ρ - плотность течения.

Решается совместно с граничными условиями первого рода (Дирихле) и второго рода (Неймана).

Фильтрация течений

Основные допущения для течения:

- несжимаемое,
- изотермическое.

Основное уравнение:

$$\frac{k_x}{\rho g} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{k_y}{\rho g} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{k_z}{\rho g} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{1}{e} \frac{\partial P}{\partial t},$$

где P - давление течения,

t - время,

ρ - плотность течения,

g - ускорение свободного падения,

k_x, k_y, k_z - главные значения тензора коэффициентов проницаемости среды течения,

e - модуль упругости среды течения (1 / коэффициент водоотдачи среды течения).

Компоненты вектора скорости течения:

$$V_x = -k_x \frac{\partial P}{\partial x}, \quad V_y = -k_y \frac{\partial P}{\partial y}, \quad V_z = -k_z \frac{\partial P}{\partial z}.$$

Скорость течения:

$$\bar{V} = \bar{V}_x + \bar{V}_y + \bar{V}_z, \quad V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2}.$$

Решается совместно с граничными условиями первого рода (Дирихле) и второго рода (Неймана).

Течения Навье-Стокса

Численные решения уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу, и сопряженных уравнений, совокупно описывающие различные характеристики и параметры течений, реализованы в виде алгоритмов с использованием метода конечных элементов и других численных методов, в зависимости от постановок решаемых задач.

Непрерывная постановка

Условные обозначения

Независимые переменные:

x, y, z - координаты.

t - время.

Степени свободы:

V_x, V_y, V_z - компоненты вектора скорости.

P - давление.

T - температура.

Исходные свойства:

ρ - плотность.

μ - динамическая вязкость.

C_p - удельная теплоемкость.

K - теплопроводность.

Расчетные свойства:

ρ - плотность.

μ_t - турбулентная вязкость.

μ_e - эффективная вязкость.

K_t - турбулентная теплопроводность.

K_e - эффективная теплопроводность.

Остальные обозначения:

V - скорость.

a_x, a_y, a_z - компоненты вектора ускорения.

Φ - диссипация вязкости.

C_μ, C_1, C_2 - коэффициенты моделей турбулентности.

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon, \sigma_\omega, \sigma_m, \sigma_t$ - числа Прандтля (Шмидта).

Базовые законы сохранения

- уравнение неразрывности (физический принцип: закон сохранения массы);
- уравнение движения (физический принцип: II закон Ньютона);
- уравнение энергии (физический принцип: закон сохранения энергии).

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0.$$

Уравнения движения

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho V_x V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_x)}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial V_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho a_x, \\ & \frac{\partial(\rho V_x V_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_y)}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho a_y, \\ & \frac{\partial(\rho V_x V_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y V_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z V_z)}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial V_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho a_z, \end{aligned}$$

где

$$\mu_e = \mu + \mu_t.$$

Уравнение энергии

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho V_x C_p T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y C_p T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z C_p T)}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(K + \frac{K_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(K + \frac{K_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(K + \frac{K_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi, \end{aligned}$$

где

$$\Phi = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_k}.$$

Турбулентные свойства (Zero Equation модель)

$$\mu_t = L_s^2 \rho \sqrt{\Phi},$$

$$K_t = \frac{\mu_t C_p}{\sigma_t} = \frac{C_p}{\sigma_t} L_s^2 \rho \sqrt{\Phi}.$$

Задача решается совместно с граничными условиями первого рода (Дирихле) и второго рода (Неймана):

$$\varphi|_{S_1} = f_1(x, y, z), \quad \frac{\partial \varphi}{\partial n}|_{S_2} = f_2(x, y, z),$$

где f_1, f_2 – известные функции, S_1 – часть граничной поверхности на которой задано распределение степени свободы φ , S_2 – часть граничной поверхности на которой задано распределение потоков φ ; n – единичный вектор внешней нормали к поверхности.

Конечно-элементная постановка

Для численного решения поставленных задач необходимо перейти к дискретному представлению. В качестве метода дискретизации используется метод конечных элементов.

Уравнение для давлений:

$$\begin{aligned} [P]^e \int \left[\frac{\partial W}{\partial x} \rho M_x \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \rho M_y \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \rho M_z \frac{\partial W}{\partial z} \right] d\Omega = \\ = \int \left[\frac{\partial W}{\partial x} \rho V'_x + \frac{\partial W}{\partial y} \rho V'_y + \frac{\partial W}{\partial z} \rho V'_z \right] d\Omega - \int W [\rho V_x]^s dS - \int W [\rho V_y]^s dS - \int W [\rho V_z]^s dS \end{aligned}$$

где $[P]^e$ – узловый вектор давлений в конечном элементе; W – вектор узловых базисных функций; M_x, M_y, M_z – константы; V'_x, V'_y, V'_z – компоненты вектора усредненных скоростей; V_x, V_y, V_z – компоненты вектора скоростей, заданной в явном виде; S – поверхность, на которой заданы потоки в явном виде; Ω – объем конечного элемента.

Уравнения для компонент скоростей:

$$\begin{aligned} [V_x]^e \int \left[\frac{\partial W}{\partial x} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial W}{\partial z} \right] d\Omega + \\ + [V_x]^e \int W \left[\frac{\partial(\rho V_x W)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y W)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z W)}{\partial z} \right] d\Omega + \\ + [V_x]^e C \int K \left[\frac{V_x \partial W}{\partial x} + \frac{V_y \partial W}{\partial y} + \frac{V_z \partial W}{\partial z} \right] \times \left[\frac{\partial(\rho V_x W)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y W)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z W)}{\partial z} \right] d\Omega = \\ = \int W \rho a_x d\Omega - [P]^e \int W \frac{\partial W}{\partial x} d\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& [V_y]^e \int \left[\frac{\partial W}{\partial x} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial W}{\partial z} \right] d\Omega + \\
& + [V_y]^e \int W \left[\frac{\partial(\rho V_x W)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y W)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z W)}{\partial z} \right] d\Omega + \\
& + [V_y]^e C \int K \left[\frac{V_x \partial W}{\partial x} + \frac{V_y \partial W}{\partial y} + \frac{V_z \partial W}{\partial z} \right] \times \left[\frac{\partial(\rho V_x W)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y W)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z W)}{\partial z} \right] d\Omega = \\
& = \int W \rho \alpha_y d\Omega - [P]^e \int W \frac{\partial W}{\partial y} d\Omega \\
& [V_z]^e \int \left[\frac{\partial W}{\partial x} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_m} \right) \frac{\partial W}{\partial z} \right] d\Omega + \\
& + [V_z]^e \int W \left[\frac{\partial(\rho V_x W)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y W)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z W)}{\partial z} \right] d\Omega + \\
& + [V_z]^e C \int K \left[\frac{V_x \partial W}{\partial x} + \frac{V_y \partial W}{\partial y} + \frac{V_z \partial W}{\partial z} \right] \times \left[\frac{\partial(\rho V_x W)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y W)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z W)}{\partial z} \right] d\Omega = \\
& = \int W \rho \alpha_z d\Omega - [P]^e \int W \frac{\partial W}{\partial z} d\Omega
\end{aligned}$$

где $[V_x]^e$, $[V_y]^e$, $[V_z]^e$ – узловые вектора компонент скоростей в конечном элементе; C , K – вычисляемые коэффициенты.

Уравнение для температуры:

$$\begin{aligned}
& [T]^e \int \left[\frac{\partial W}{\partial x} \left(K + \frac{K_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial y} \left(K + \frac{K_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial W}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \left(K + \frac{K_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial W}{\partial z} \right] d\Omega + \\
& + [T]^e \int W \left[\frac{\partial(\rho C_p V_x W)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_p V_y W)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho C_p V_z W)}{\partial z} \right] d\Omega + \\
& + [T]^e C \int K \left[\frac{V_x \partial W}{\partial x} + \frac{V_y \partial W}{\partial y} + \frac{V_z \partial W}{\partial z} \right] \times \\
& \times \left[\frac{\partial(\rho C_p V_x W)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_p V_y W)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho C_p V_z W)}{\partial z} \right] d\Omega = \\
& = \int Q W d\Omega + \int q W dS
\end{aligned}$$

где $[T]^e$ – узловой вектор температур в конечном элементе; C , K – вычисляемые коэффициенты.