

**Математическое моделирование турбулентного пограничного слоя в канале в рамках IDDES подхода**

**Научный руководитель – Меньшов Игорь Станиславович**

*Соломатин Роман Сергеевич*

*Аспирант*

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

*E-mail: roman.solomatin.94@gmail.com*

Данная работа посвящена созданию комплексной физико-математической модели для моделирования процессов смешения и горения в сверхзвуковых газовых потоках. В современных камерах сгорания потоки топлива и окислителя имеют сверхзвуковые характерные скорости, а проведение математического моделирования на сегодняшний день является важнейшим этапом новых инженерных разработок. Использование RANS подхода способно предсказать только средние характеристики потоков, а использование подходов DNS и LES для течений с характерными числами Рейнольдса, представляющими научный и практический интерес до сих пор остается недоступным из-за чрезвычайной трудоемкости.

В работе рассматривается газодинамическая модель, основанная на гибридном подходе к моделированию турбулентности IDDES [4], сочетающий преимущества подходов RANS и LES, а также минимизирующий недостатки классического подхода DES. В качестве полуэмпирической модели турбулентности используется модель Спаларта-Аллмараса (SA). Коэффициенты теплопроводности рассчитываются с использованием аналогии Рейнольдса, коэффициенты диффузии - с использованием закона Фика. Интегрирование по времени выполняется с использованием гибридной явно-неявной схемы с локальным параметром гибридности или схемы Кранка-Николсон. Основным численным методом является параллельная реализация GMRES-LU-SGS алгоритма. Для повышения порядка аппроксимации по пространству используется основанная на MUSCL-подходе схема третьего порядка, обобщенная для неравномерных сеток. Вычисление конвективных потоков выполняется по методу Годунова без использования ограничителя потоков. Для вычисления вязких потоков используется обобщенная схема центральных разностей. Подробно модель и численный метод описаны в [2].

С использованием выбранной схемы были выполнены расчеты нестационарного слоя в плоском канале для дозвукового потока и прямоугольном канале для сверхзвукового потока. Характерные размеры и параметры потока для дозвуковой постановки были взяты из работы [1]. Рассматривалось течение, соответствующее  $Re_{\tau} = 18000$ . На боковых границах области выставлялись периодические условия. Результаты расчета сравнивались с профилями из [1]. Было достигнуто хорошее соответствие по профилям полных напряжений, однако средняя скорость в центре канала получилась завышенной. В сверхзвуковой постановке поперечные размеры канала и параметры потока соответствовали изолятору камеры Барроуса-Куркова [3]. Длина области составляла 10 см. По итогам расчетов было получено хорошее соответствие между решением RANS и осредненным решением IDDES.

Расчеты выполнялись на кластере «МВС-10П» МСЦ РАН.

Работа проводилась в рамках государственного задания ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН по теме № 0580-2021-0005 "Математическое моделирование динамических процессов в деформируемых и реагирующих средах с использованием многопроцессорных вычислительных систем" (№ 121031300050-6).

### Источники и литература

- 1) Гарбарук, А.В., Е.К. Гусева. Расчет развитого течения в плоском канале с использованием вихреразрешающих подходов. Приложение 1: Gritzkevich M.S., A.V. Garbaruk, and F.R. Menter. IDDES of developed channel flow in ANSYS Fluent // Курс лекций «Современные методы расчета турбулентных течений», СПбПУ. 2018. 32 С.
- 2) Соломатин Р.С., Численное моделирование детонационных процессов в неоднородных топливо-воздушных смесях // выпускная квалификационная работа аспиранта. ИПМ им. М.В. Келдыша. 2021. 144 С.
- 3) Burrows, M.C., and A.P. Kurkov. Supersonic Combustion of Hydrogen in a Vitiated Air Stream Using Stepped-wall Injection // NASA-TM-67840. 1971. 15 p.
- 4) Shur, M.L., P.R. Spalart, M.Kh. Strelets, and A. Travin. A hybrid RANS-LESS approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities. International Journal of Heat and Fluid Flow 29. 2008. Pp. 1638-1649.