

## ОТЗЫВ

отечественного научного руководителя о диссертационной работе  
Инкарбекова Медета Каркынбековича

на тему «Высокопроизводительный 3D симулятор для моделирования турбулентных реагирующих течений методом крупных вихрей с использованием фильтрованной функции плотности», представленной в диссертационный совет при КазНУ им. аль-Фараби на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности – «6D060300-Механика».

Турбулентность остается одной из важнейших нерешенных проблем не только физики, в частности механики жидкости и газа и, но и математики.

Если с точки зрения гидромеханики и физики проблема заключается в отсутствии полного понимания свойств турбулентных течений и в настоящее время нет и в обозримом будущем не предвидится возможности количественного описания течения жидкостей при всех числах Рейнольдса, несмотря на её огромную важность для науки и техники, то с точки зрения математики нет доказательств существования и гладкости решения 3D уравнений Навье-Стокса (УНС). В отсутствие серьезных продвижений в теоретическом изучении турбулентности большое значение приобретают экспериментальные и численные методы исследования, в особенности, численные модели и методы в сочетаниях с современными компьютерными технологиями вычисления.

В настоящее время имеется три подхода для численного моделирования турбулентных течений с разной точностью описания и ограниченные по применению разными числами Рейнольдса. Это – RANS (усредненные по времени (по Рейнольдсу) УНС), LES (метод крупных вихрей) и DNS (прямое численное интегрирование УНС).

RANS является самой грубой моделью, в ней все вихревые структуры течения усредняются, т.е. моделируется, но данный подход позволяет решать практически все задачи без ограничения на число Рейнольдса.

DNS позволяет прямо описать турбулентные течения с точностью аппроксимаций разных дифференциальных операторов и машинного округления арифметических операций, но сильно ограничен числом Рейнольдса. Связано это с тем, что при расчете турбулентных течений с учетом соотношения между самыми большими и малыми масштабами вихрей и трехмерности задачи, шага интегрирования по времени и интервала времени, суммарное число операций составляет порядка  $Re^3$ . Для примера, число Рейнольдса течения воздуха, обтекающего автомобиль со скоростью 100 км/час составляет около 10<sup>6</sup>, а число Рейнольдса атмосферных течений, определяющие погоду, варьируются в пределах 10<sup>9</sup> - 10<sup>11</sup>.

Подход LES занимает промежуточное положение между ними: в нем крупные вихри (вихри размерами больше размера сетки при численном решении) решаются прямо, а мелкие подсеточные вихри надо моделировать. Ограничение по числу Рейнольдса значительно слабее, чем в DNS и в настоящее время с развитием как методов расчета, так и вычислительных и компьютерных



технологий, становится главным инструментом для исследования турбулентных течений.

В работе Инкарбекова М. разработан и создан программный код для моделирования и исследования 3-х мерных реагирующих турбулентных течений несжимаемой жидкости. Численное моделирование турбулентных течений проводится методом крупных вихрей LES. Полученные уравнения решаются разрывным методом Галеркина (DG), что обеспечивает высокую точность нахождения таких динамических величин течения, как скорость и давление.

Для замыкания источника химической реакции применяется метод фильтрованной функции плотности (FDF), что позволяет замкнуть химические источниковые члены без привлечения моделирования. Уравнение переноса FDF решается численно с помощью лагранжевого метода Монте-Карло (MC).

Гибридная схема численного решения DG-MC построена таким образом, чтобы её можно было реализовать с использованием параллельных вычислений. Параллельная версия кода реализована с помощью технологии CUDA для проведения расчетов на вычислительных системах, основанных на графических устройствах, что позволяет проводить вычисления с высокой производительностью. Это существенно расширяет исследователям круг доступных для численного исследования задач реагирующих турбулентных течений.

В ходе выполнения задачи диссертации Медет проявил твердое знание в методах исследования и усердие в достижений цели, что явилось основой успешного завершения работы. Успеху диссертации также способствовало то, что зарубежный руководитель Медета предоставил прекрасную возможность поработать в их лабораторий, получить консультации, как говорится, с первых рук, в частности, у разработчика метода FDF профессора Питсбургского университета Reuman Givi.

При выполнении диссертации Медет проявил большую самостоятельность при выборе методов их изучения и анализе полученных результатов. Тем самым показал себя как вполне состоявшееся научный работник.

Диссертационную работу Инкарбекова М. «Высокопроизводительный 3D симулятор для моделирования турбулентных реагирующих течений методом крупных вихрей с использованием фильтрованной функции плотности», считаю полностью завершенной. Представленная диссертация может быть допущена к защите на соискание академической степени доктора философии (PhD) по специальности «6D060300-Механика».

Отечественный научный руководитель  
д.ф.-м.н., профессор



А. Калтаев