

УДК 532.5

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ  
ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ЗАКРУЧЕННОМ ПОТОКЕ  
С РАСПРЕДЕЛЁННЫМ ИСТОЧНИКОМ НАГРЕВА**

Горбунова А. О., Порфирьев Д. П.

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика  
С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), г. Самара

Исследование структуры крупномасштабных вихревых возмущений представляет интерес в связи с интенсивным развитием технологий, в которых использование закрученных потоков представляется очень перспективным, в таких как авиационная мобильность, энергоэффективность и энергосбережение.

При определённых параметрах закрутки в вихревом потоке в результате потери устойчивости возникает крупномасштабная винтовая структура – прецессия вихревого ядра (ПВЯ). Целью данной работы является исследование зависимости частоты прецессии вихревого ядра от мощности локализованного источника тепловыделения. Рассматриваются различные варианты расположения источника, а также стационарный и нестационарный режимы тепловыделения. Моделирование проводилось для вихревой камеры с открытым концом, геометрия которой аналогична экспериментальной установке в работе [1].

Исследуемая среда описывается системой уравнений Навье-Стокса [2]. Численное моделирование проводилось в программном пакете ANSYS Fluent 14.0 с использованием суперкомпьютера «Сергей Королёв». В данном пакете реализован метод конечных объёмов. Для пространственной дискретизации уравнений переноса скалярных величин была выбрана схема с разностями против потока второго порядка, для дискретизации по времени – неявная схема второго порядка. Градиент давления рассчитывался по схеме PRESTO! (PREssure STaggering Option), рекомендуемой для сильнозакрученных потоков. Связь поля скоростей с полем давления при расчёте несжимаемых течений реализована с использованием процедуры SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). В качестве граничных условий задан постоянный входной массовый расход газа, а также условие прилипания на стенках системы и постоянное давление на выходе из камеры.

Расчётная сетка состоит из 444 454 гексаэдрических ячеек. Данное разбиение обеспечивает достаточно точное решение поставленной задачи: при дальнейшем увеличении числа ячеек усреднённые по времени профили скоростей не меняются, а основная исследуемая величина – частота прецессии вихревого ядра – менялась не более, чем на 2 %.

Также проведена оценка применимости моделей турбулентности, основанных на осреднении уравнений Навье-Стокса по Рейнольдсу для данной задачи. Показано, что использование моделей Spalart-Allmaras,  $k-\omega$  и  $SST\ k-\omega$  даёт результаты, наиболее близко соответствующие экспериментальным данным [3]. При этом все модели турбулентности дают качественно схожие зависимости частоты ПВЯ от мощности нагрева.

Варьирование расположения локализованного источника тепловыделения показало, что при источнике, расположенном в начале или середине камеры, наблюдается возрастающая, близкая к линейной зависимость частоты от мощности нагрева источника. Данная зависимость согласуется с результатами линейного анализа устойчивости вихревого течения с противотоком и скачком плотности [4]. Однако при

расположении источника в конце трубы зависимость приобретает немонотонный характер, что требует дополнительного исследования.

Моделирование потока в присутствии нестационарного источника тепловыделения на различных частотах модуляции показало, что нестационарность оказывает незначительное влияние на зависимость частоты ПВЯ от мощности нагрева, за исключением случая с частотой модуляции, близкой к собственной частоте вихревой камеры. В этом случае наблюдается резкий рост колебаний всех исследуемых гидродинамических величин на частоте модуляции и значительное уменьшение амплитуды ПВЯ.

Работа поддержана Минобрнауки РФ в рамках Программы повышения конкурентоспособности СГАУ на 2013-2020 гг., государственного задания вузам и научным организациям в сфере научной деятельности (проекты № 102, 608, 1451), грантами РФФИ 13-01-97001, 13-01-97005, 14-02-97030 p\_поволжье\_a.

#### Библиографический список

1. Завершинский И.П., Климов А.И., Макарян В.Г., Молевич Н.Е., Моралев И.А., Порфирьев Д.П. Структура высокочастотного емкостного разряда в закрученном потоке воздуха при атмосферном давлении // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37, 23. – С. 68-75.
2. Бэтчелор, Дж. Введение в динамику жидкости. - М.: Мир, 1973. – 778 с.
3. Makaryan, V.G., Molevich, N.E., Porfiriev, D.P., Sugak, S.S., Zavershinsky, I.P. Precessing vortex core in the variable density swirling flows. Proc. 12th Workshop on magneto-plasma aerodynamics. 10.04-12.04.2013, pp. 65-66.