

УДК: 532.527.004.14

Коноваленко В.А., Мочалин Е.В., д.т.н., проф.

Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ВИХРЕВОЙ ТРУБЕ

Вихревой эффект, или эффект Ранка [1], проявляется в закрученном потоке вязкой сжимаемой жидкости и реализуется в простом устройстве, называемом вихревой трубой (трубой Ранка-Хилша), схематическая конструкция которой изображена на рис. 1.

Вихревой эффект энергетического разделения газа заключается в том, что если в трубу подать закрученный поток газа, то в ней при определенных условиях будет происходить температурное разделение газа. В центре образуется более холодный, чем на периферии, поток, и через центральное отверстие одного из концов трубы будет выходить газ, температура которого окажется значительно ниже, чем на входе.

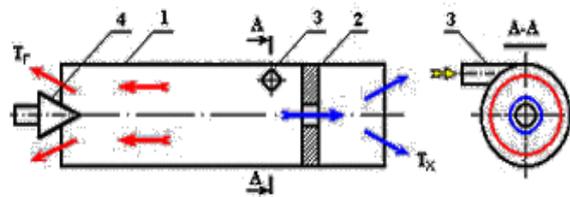


Рис.1 – Схематическая конструкция вихревой трубы: 1 - труба, 2 - диафрагма, 3 - сопло, 4 – вентиль

Периферийные слои газа, имеющие более высокую температуру, будут выходить через дроссельное отверстие с другого конца трубы. Такая схема вихревой трубы была названа противоточной [2,3].

Исключительная простота устройства, надежность в эксплуатации и малый



вес при наличии перепада давления делают возможным техническое использование эффекта Ранка, например, для охлаждения оборудования. Явление, происходящее в вихревой трубе, представляет собой сложный газодинамический процесс, совершаемый в пространственном турбулентном потоке вязкого сжимаемого газа. На современном этапе теоретический анализ этого процесса находится в стадии развития, так как вихревой эффект, несмотря на довольно продолжительный срок исследований, до сих пор не имеет единого, признанного всеми, научного объяснения.

Ранк объяснил явление вихревого эффекта тем, что сжатые внешние слои обладают незначительной угловой скоростью, напротив, расширившиеся центральные слои обладают энергией главным образом в кинетической форме, так как они вращаются с очень большой угловой скоростью. Причем угловые скорости газовых слоев обратно пропорциональны квадратам их диаметров. Подобное распределение скоростей неизбежно вызывает трение между соседними слоями. Вследствие этого, при достаточной длине слоев, устанавливается состояние равновесия, при котором все слои вращаются с одинаковой угловой скоростью. Таким образом, происходит центробежный перенос энергии, при котором центральные слои сообщают свою скорость внешним слоям. Немецкий физик Рудольф Хилш в своем объяснении эффекта Ранка, в основном, повторяет его теорию о разделении потока газа.

Позже идею передачи энергии в вихре доработал Фультон. Он считал, что в процессе движения газа в вихревой трубе имеет место перестройка «свободного вихря», где тангенциальная скорость в рассматриваемой точке обратно пропорциональна ее расстоянию от оси трубы, в «вихрь вынужденный», в котором скорость прямо пропорциональна расстоянию. Возникающий при этом центробежный перенос энергии внутренних слоев к наружным несколько компенсируется переносом тепла в противоположном направлении. Расчет распределения температур по этой теории дает



Міжнародна науково-технічна конференція "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці"
Секція I
"Технічна гідромеханіка"

значительно меньшее изменение температуры, чем получается в действительности.

Расхождение теоретических и экспериментальных данных можно объяснить тем, что при расчете температурного эффекта используется только часть избыточной энергии, передаваемой от осевого потока к периферийному в виде скоростного напора. Избыточная потенциальная энергия осевого потока в математической теории Фультона никак не учитывается. Это приводит к тому, что теоретическое изменение температуры значительно меньше экспериментального.

Существует ряд работ, теоретически иначе объясняющих процесс температурного разделения газа, например, Шпренгер объясняет это разделение сильными ультразвуковыми колебаниями, возникающими в вихревом потоке.

Наличие противоречивых мнений о физической сущности происходящего явления и отсутствие теории заставляет проводить обширные исследования вихревой трубы.

Практически до настоящего времени не разработаны способы исследования данного процесса и расчета оптимальных характеристик вихревых труб аналитическим способом. Известные математические модели слабо имитируют условия процессов из-за малых возможностей ЭВМ, имевшихся на тот период.

В настоящее время для исследования процессов в вихревой трубе может применяться численное моделирование при помощи современных CFD-комплексов, например, ANSYS FLUENT. Современные CFD-комплексы позволяют строить так называемые «виртуальные стенды» для исследования и оптимизации параметров изделий. Использование CFD-моделей позволяет значительно сэкономить время и средства при анализе чувствительности, проработке различных концептуальных проектов и позволяет отобрать наиболее перспективные конструкции.



В настоящей работе выполнено сравнение результатов численного моделирования гидродинамических и тепловых процессов в противоточной вихревой трубе, полученных в различных постановках, между собой и с достоверными эмпирическими результатами, калиброванными на экспериментальных данных. Рассматривалась как трехмерная формулировка задачи, так и возможность применения более экономного осесимметричного подхода. Сравнивались результаты использования как более простых двухпараметрических моделей турбулентности (на примере SST $k - \omega$ модели Ментера), так и модели переноса рейнольдсовых напряжений (модель RSM) и свободной от всякой эмпирики на масштабах энергонесущих вихрей модели крупных вихрей (LES).

Результаты исследования, прежде всего, подтверждают принципиальную возможность оптимизационных исследований вихревого эффекта путем численных экспериментов. Кроме этого, показано, что существует возможность выбора более экономного, с точки зрения требуемых вычислительных ресурсов, подхода к численному решению, который обеспечивает во многих отношениях приемлемую точность расчетов.

Список литературы:

1. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике/ А.П.Меркулов. – М. Машиностроение, 1969 – 175 с.
2. Воронин Г.И. Системы кондиционирования воздуха на летательных аппаратах / Г.И. Воронин. – М.: Машиностроение, 1973. – 444 с.
3. Воронин Г.И. Конструирование машин и агрегатов систем кондиционирования / Г.И. Воронин. – М.: Машиностроение, 1978. – 544 с.