

Г. Г. ЕНИКЕЕВ, А. Т. БИКМЕЕВ, А. А. СОЛОВЬЕВ, А. А. КАСАТКИН, К. Р. ЮЛМУХАМЕТОВ

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ МНОГОФАЗНОГО ПОТОКА В ВОЗДУХОЗАБОРНИКЕ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Процесс движения многофазного потока в проточной части газотурбинного двигателя чрезвычайно сложен и недостаточно изучен. В воздухозаборном устройстве, компрессоре, камере сгорания, турбине, сопле имеются свои особенности движения многофазного потока. Выполнен анализ наличия математических моделей в программных комплексах (ПК) STAR-CD, STAR-CCM, ANSYS CFX, FLUENT для решения задач движения многофазных дисперсных потоков в газозо-воздушном тракте (ГВТ) газотурбинного двигателя (ГТД). Показано, что при небольшой концентрации дисперсных частиц в воздухе наиболее рациональным является определение поля течения газа в постановке Эйлера и решение задачи о движении дисперсных частиц в постановке Лагранжа. В качестве примера решена пространственная задача обтекания лобового воздухозаборника сжимаемым, вязким турбулентным потоком воздуха в постановке Эйлера. Решение выполнено для воздухозаборника NASA 1-70-50. Показано хорошее совпадение результатов численного моделирования с экспериментом. *Газотурбинный двигатель; газозо-воздушный тракт; многофазный дисперсный поток; сжимаемый, вязкий турбулентный поток; математическая модель; численное моделирование; программные комплексы; тестовые задачи*

Эксплуатация газотурбинных двигателей практически всегда осуществляется при наличии в воздухе дисперсных частиц. В большинстве случаев их концентрация настолько мала, что их присутствием можно пренебречь, так как их влияние на характеристики двигателя несущественно. Но при эксплуатации ГТД в запыленной атмосфере или в морской среде происходит значительное изменение их характеристик из-за эрозионного износа лопаток компрессора или отложения соли в проточной части и коррозии, что сопряжено со снижением надежности и безопасности эксплуатации транспортных устройств.

Механика движения многофазного полидисперсного потока в проточной части ГТД недостаточно изучена. Исследования рабочего процесса ГТД, эксплуатирующихся в запыленной атмосфере и морской среде, дают представление о физических процессах, происходящих при движении многофазного потока в проточной части газозо-воздушного тракта. Каждый ГТД имеет свои индивидуальные особенности, и для прогнозирования изменения характеристик, а также проектирования воздухозаборников с воздухоочистителем, в условиях эксплуатации в запыленной атмосфере и морской среде требуется проведение дополнительных теоретических и экспериментальных исследований. Поэтому исследование движения многофазных потоков в газозо-воздушном тракте ГТД является актуальными.

Практика показывает, что современные программные комплексы и их реализация на компьютерах достигли совершенства и их широко используют для решения сложных задач движения многофазных сред.

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПК В РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОБТЕКАНИЯ МНОГОФАЗНЫМ ПОТОКОМ ЛОБОВОГО ВОЗДУХОЗАБОРНИКА С РОТОРНЫМ ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЕМ

Эффективным способом защиты ГТД от попадания в проточную часть дисперсных частиц является роторный воздухоочиститель, который расположен в модульной конструкции воздухозаборника [1–6]. Воздухозаборник с роторным воздухоочистителем имеет проточную часть с неподвижными поверхностями и лопаточные аппараты вращающегося рабочего колеса и неподвижного направляющего аппарата, то есть для исследования движения многофазного потока в воздухозаборном устройстве требуется весь набор математических моделей, который требуется для анализа процессов в проточной части газозо-воздушного тракта двигателя.

При движении дисперсного потока в воздухозаборном устройстве с роторным воздухоочистителем твердые частицы при встрече с неподвижной или вращающейся поверхностью отскакивают и двигаются по новым траекториям.

Математические модели программных комплексов для решения задачи движения дисперсного потока в воздухозаборном устройстве с роторным воздухоочистителем

	STAR-CD	STAR-CCM+	ANSYS CFX	ANSYS FLUENT
Расчет вращающихся лопаток – сплошная среда	Есть	Есть	Есть	Есть
	1. Вращающаяся система координат (MRF)	1. MRF	1. MRF	1. MRF
	2. Программируемые подвижные сетки	2. Вращение сетки	2. Вращение сетки	2. Вращение сетки
3. Immersed Solid – движение тела сквозь ячейки среды			3. Программируемые подвижные сетки	
Построение сетки для области вращения	Модуль ES-Turbo	Встроенный генератор сеток + Turbo Wizard, нет редактора профилей	Ansys TurboGrid – наиболее мощный инструмент построения сеток для турбомашин	
Теплообмен со средой	Есть + программирование	Есть	Есть	Есть
Массообмен со средой	Есть + программирование	Есть	Есть	Есть
Распад частиц в потоке	Reitz-Diwakar Pilch-Erdman Hsiang-Faeth	Reitz-Diwakar TAB, KHRT	Reitz-Diwakar TAB, ETAB, CTAB	TAB Волновая
Отскок от стенки, дробление и налипание	Есть Модели MPI, Bai + пользоват. подпрограмма	Есть Модель Bai-Gosman	Есть Модель Elsaesser	Есть Модель стенка–струя
Жидкая пленка на стенках	Есть, подвижная	Только спец. случаи – запотевание и обледенение	Есть, неподвижная	Есть, подвижная
Эрозия	Только пользоват. программирование	Есть	Есть	Есть

Капли при определенных условиях испаряются, дробятся, образуя ансамбль частиц с меньшими размерами. При испарении соленых капель может образоваться пересыщенный раствор.

При полном испарении соленые капли превращаются в твердые частицы. При встрече с неподвижными или вращающимися поверхностями капли прилипают и образуют пленку, которая движется под действием сил тяжести, центробежной, Кориолиса, трения о поверхность лопатки, трения газа о поверхность пленки. Могут образоваться вторичные капли за счет разбрызгивания и срыва пленки. Пленка может испаряться, образуя слой соли на поверхности лопаток.

В ПК Star-CD, Star-CCM+, Ansys CFX, Ansys Fluent заложены математические модели,

описывающие перечисленные физические процессы (таблица).

Анализ уравнений показал, что не все математические модели в отдельно взятом ПК в полной мере отражают физические процессы при движении многофазного потока в воздухозаборнике. Поэтому при решении конкретной задачи выбирается математическая модель и ПК, в котором адекватно реализуется тот или иной физический процесс. Полученные результаты импортируются в то ПК, в котором продолжается решение задачи.

Концентрация дисперсных частиц в воздухе мала и составляет не более 3...5% при эксплуатации вертолетов в запыленной атмосфере, экранопланов, кораблей на воздушной подушке, быстроходных судов в морской среде. Для малой концентрации дисперсных частиц в воздухе

является обоснованным численное моделирование движения непрерывного, несущего потока в постановке Эйлера. Моделируется обтекание воздухозаборника сжимаемым, вязким турбулентным потоком воздуха и полученные результаты используются для решения задачи движения дисперсных частиц в постановке Лагранжа. Такая методика позволяет получить информацию о параметрах каждой движущейся частицы, которая является важной при анализе рабочего процесса движения многофазного потока в воздухозаборнике с роторным воздухоочистителем и в ГВТ ГТД.

2. ОБТЕКАНИЕ ВОЗДУХОЗАБОРНИКА НЕПРЕРЫВНЫМ ПОТОКОМ

2.1. Постановка задачи

Решена задача движения непрерывного осесимметричного потока при обтекании лобового воздухозаборника НАСА 1-70-50. Результаты были представлены в сравнении с экспериментом и решением, полученным панельным методом (В. Краус). Задача решалась для следующих условий: газ сжимаемый, вязкий, турбулентный, рабочее вещество – воздух. Для решения задачи использовались полные уравнения Навье – Стокса, дополненные двухслойной k - ε -моделью турбулентности. Программная реализация выполнена в ПК ANSYS CFX и Star-CCM+ в постановке Эйлера. В невозмущенной области скорость воздуха – V_0 , давление – P_0 , плотность ρ_0 . В узком сечении внутреннего канала воздухозаборника скорость – V_i , давление – P_i , плотность ρ_i . Численные расчеты выполнялись для двух отношений скоростей воздуха в узком сечении воздухозаборника и в невозмущенной области: $V_i/V_0 = 0,216$ и $V_i/V_0 = 0,428$. Рассчитывалось распределение давления по внешней поверхности обечайки воздухозаборника, которое определялось коэффициентом давления C_p . Коэффициент давления вычислялся по формуле:

$$C_p = \frac{P_i - P_0}{\frac{1}{2} \rho V_0^2},$$

где P_i – давление на поверхности; P_0 – давление в невозмущенном потоке; V_0 – скорость в невозмущенной области. При подготовке к решению задачи выполнялись стандартные процедуры импорта геометрии, создания расчетной области, построения сеток и задания граничных условий.

2.2. Геометрические размеры воздухозаборника

Схема воздухозаборника и основные геометрические размеры приведены на рис. 1. Исследуемый воздухозаборник относится к серии НАСА 1 с отношением площадей $A_{\min}/A_m = 0,7$ и отношением длины к максимальному диаметру $L/D_m = 0,5$. Основные соотношения для расчета геометрических параметров воздухозаборника серии НАСА 1-70-50 с параметрами k_1, k_2 (в нашем случае $k_1 = 0,7, k_2 = 0,5$) следующие:

$$R_0 = k_1 R_m,$$

$$R_{\min} = R_0 - 0,025(R_m - R_0),$$

$$L = 2k_2 R_m,$$

$$\frac{y'}{R_m - R_0} = f\left(\frac{x'}{L}\right),$$

где R_0 – радиус носка воздухозаборника. Форма внешней поверхности задаётся таблицей значений функции f и является поверхностью постоянного радиуса со скруглением на конце (дуга окружности). Внешний радиус R_m выбран равным 0,6 м.

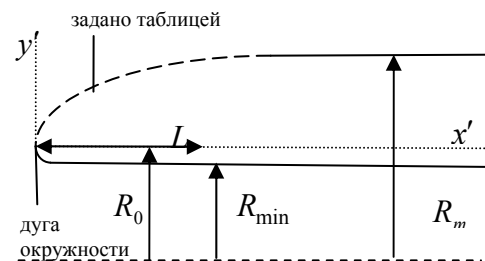


Рис.1. Геометрия воздухозаборника НАСА 1-70-50

Для построения геометрии воздухозаборника в пакете Star-CCM+ написана программа-макрос на Java. Программа считывает параметры таблицы из внешних файлов, строит кривую из отрезков сплайнов и дуг и путём её вращения вокруг оси создает тело – область течения. При этом внешние границы области течения отодвигаются от воздухозаборника на 4...5 калибров.

2.3. Расчетная область, граничные условия и построение сетки

Расчетная область выполнена для четвертой части воздухозаборника, в целях экономии машинных ресурсов (рис. 2). Границы расчетной области отодвинуты от входа в воздухозаборник на пять калибров, для исключения влияния возмущения поля скоростей и давлений на результаты решения задачи.

На выходе из канала воздухозаборника задана скорость $V_i = 30 \text{ м/с}$, а на входе в расчетную область – V_0 , соответствующая выбранным значениям V_i/V_0 . Заданы две плоскости симметрии. Свободный поток определяется атмосферным давлением P_0 . В расчетной области построена сетка из 593 тыс. многогранных ячеек с призматическими слоями вдоль стенок воздухозаборника (рис. 3). Вблизи особой точки и поверхности обечайки выполнено сгущение ячеек для увеличения точности расчетов.

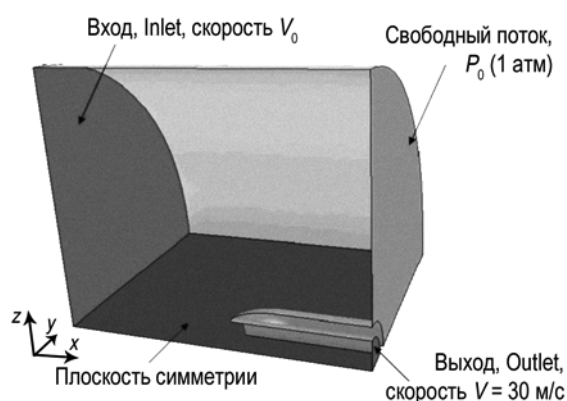


Рис.2. Геометрия расчетной области и граничные условия

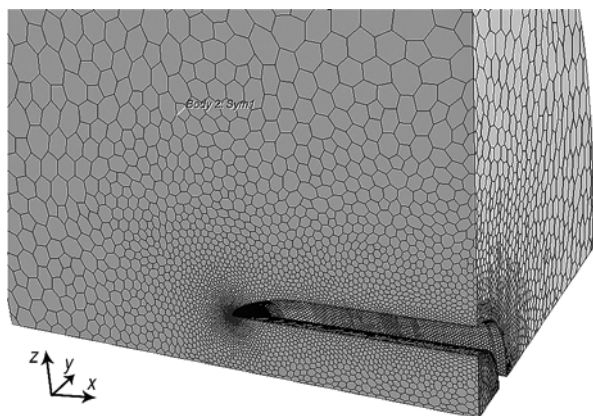


Рис. 3. Сетка в расчетной области

2.4. Результаты вычислений

Результаты вычислений обтекания воздухозаборника представлены в виде визуализации течения и в виде количественных зависимостей распределения давления по внешней поверхности.

Линии тока в расчетной области показаны на рис. 4. Расчеты в ПК Star-CCM+ и в ПК Ansys CFX дали схожие результаты. Вблизи носка обечайки воздухозаборника происходит разделение потока и увеличение скорости и при переходе к цилиндрической части его торможение.

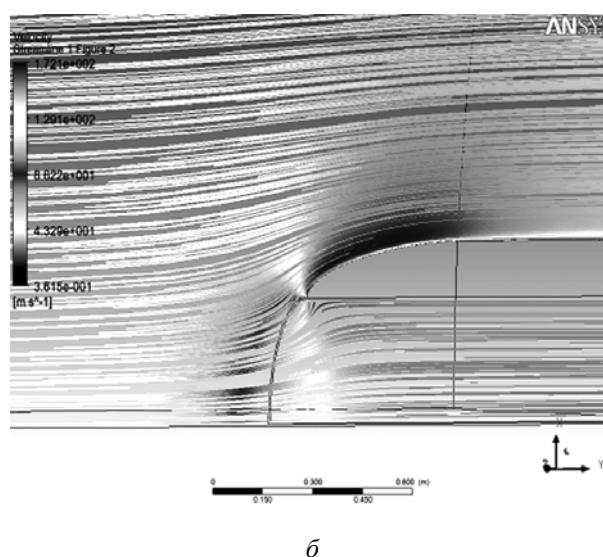
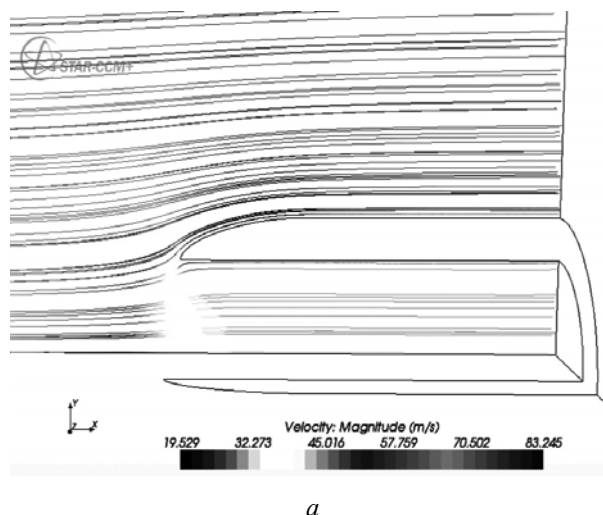


Рис.4. Линии тока в расчетной области для режима течения $V_i/V_0 = 0,428$:
а – расчет в ПК Star-CCM+;
б – расчет в ПК Ansys CFX

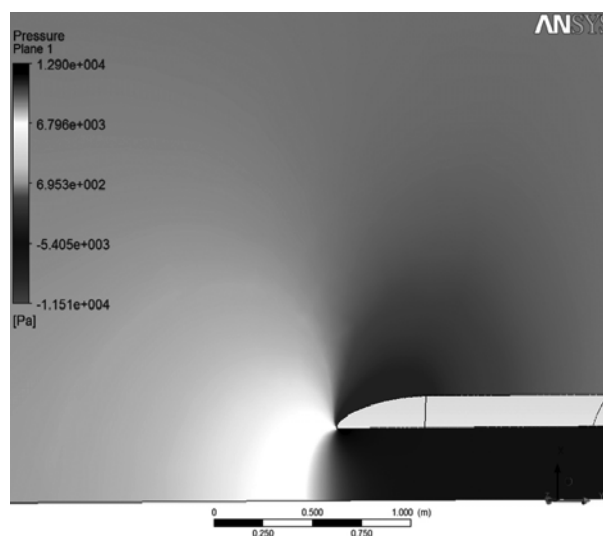
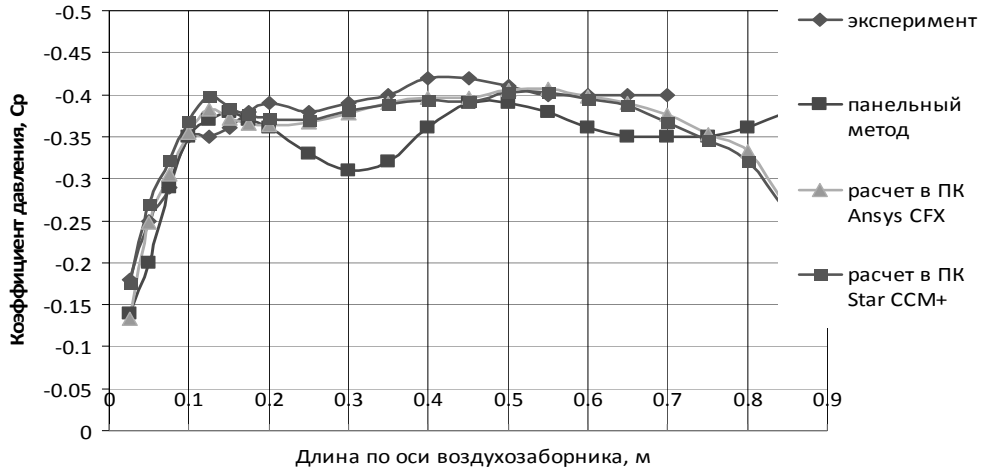
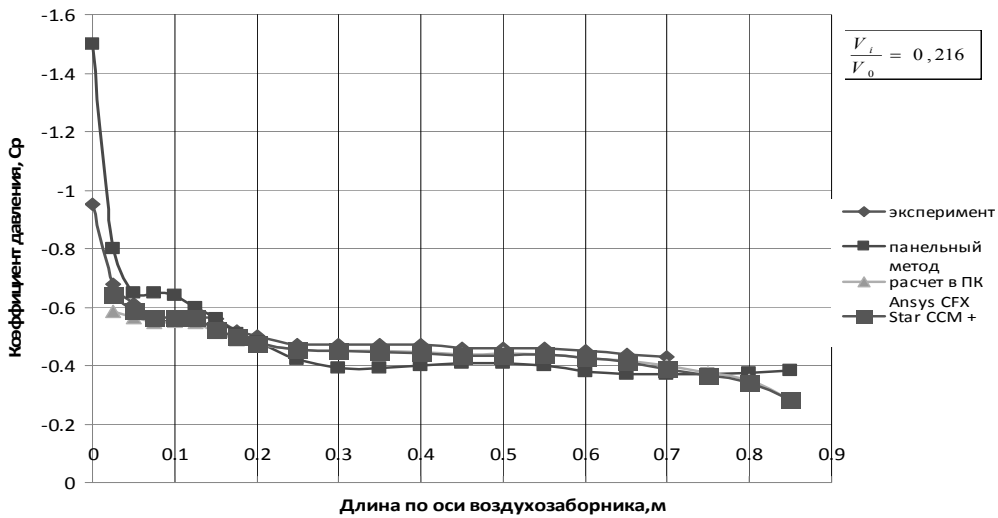


Рис.5. Распределение давления в расчетной области для режима течения $V_i/V_0 = 0,428$

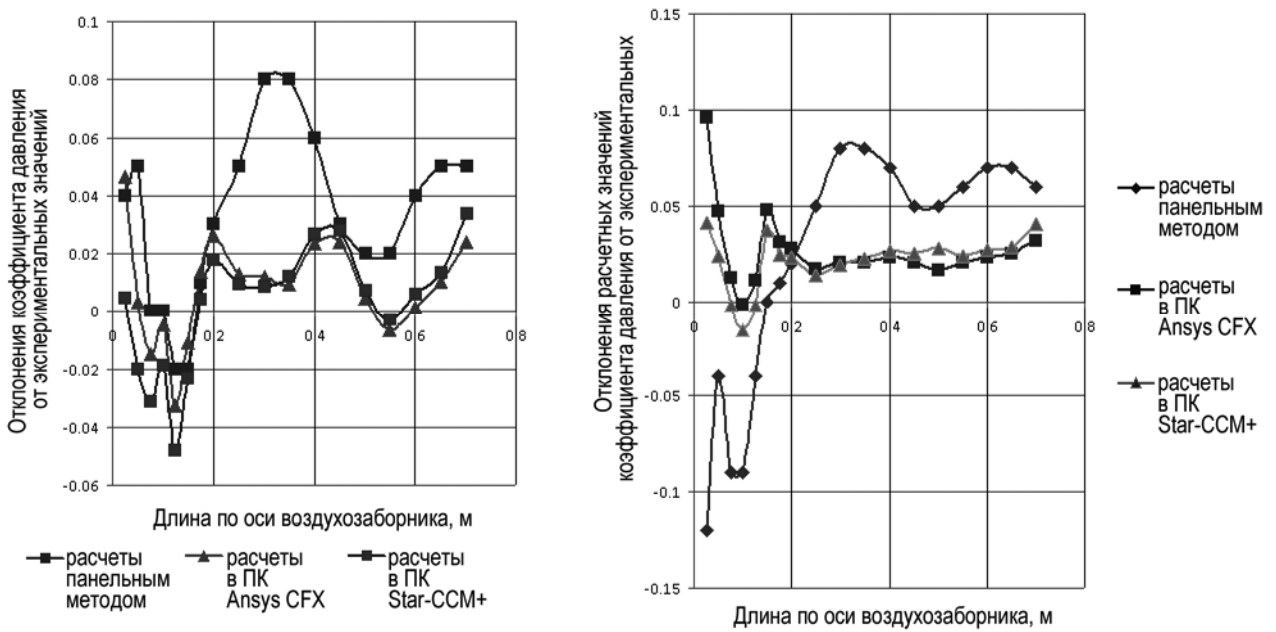


а



б

Рис. 6. Распределение давления по внешней поверхности воздухозаборника NASA 1-70-50
а – режим течения $V_i/V_0 = 0,428$; б – режим течения $V_i/V_0 = 0,216$



а

б

Рис.7. Точность вычислений распределения давления по внешней поверхности воздухозаборника NASA 1-70-50 в сравнении с экспериментом:

а – режим течения $V_i/V_0 = 0,428$; б – режим течения $V_i/V_0 = 0,216$

Распределение давления в расчетной области показано на рис. 5. В области криволинейной внешней поверхности обечайки происходит уменьшение давления, вызванное ускорением потока. Во внутреннем канале воздухозаборника происходит торможение потока.

Количественные результаты расчета представлены в виде зависимостей коэффициента давления C_p от расстояния по оси воздухозаборника (рис. 6). На графиках (рис. 6.) видно хорошее совпадение результатов расчета в ПК Star-CCM+ и Ansys CFX с экспериментом для режимов обтекания $V_i/V_0 = 0,428$ и $V_i/V_0 = 0,216$. На этом же рисунке приведены результаты, полученные В. Краусом панельным методом. В диапазоне $X = 0,2 \dots 0,4$ (режим $V_i/V_0 = 0,428$) панельный метод дает большее расхождение с экспериментом. В диапазоне $X = 0,1 \dots 0,15$ (режим $V_i/V_0 = 0,428$) все три результата вычислений показывают некоторое расхождение с экспериментом. Объясняется это близким расположением к носку воздухозаборника.

Для режима течения $V_i/V_0 = 0,216$ расчетные методы дают хорошее совпадение с результатами эксперимента по всей поверхности за исключением области вблизи носка воздухозаборника.

Более точно о совпадении результатов численных расчетов с экспериментом можно судить по графикам отклонений (рис. 7). В диапазоне $X = 0,03 \dots 0,2$ отклонения коэффициента давления составляют $\pm 5\%$. В диапазоне $X = 0,18 \dots 0,6$ отклонения коэффициента давления составляют $0 \dots 3\%$ для расчетов для режима течения $V_i/V_0 = 0,428$.

Для режима течения $V_i/V_0 = 0,216$ решения в ПК Star-CCM+ и в ПК Ansys CFX дают более точный результат, чем панельный метод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ математических моделей, приведенных в программных комплексах (ПК) Star-CD, Star-CCM+, Ansys CFX, Ansys Fluent, для решения задачи движения многофазного потока при обтекании лобового воздухозаборника с роторным воздухоочистителем. В перечисленных ПК математические модели практически полностью охватывают физические процессы, происходящие при движении многофазного потока в воздухозаборном

устройстве с роторным воздухоочистителем. Но если взять каждый ПК в отдельности, то не все физические процессы описаны в полной мере. Поэтому можно использовать преимущества каждого пакета для решения задачи в полном объеме.

Небольшая концентрация дисперсных частиц в потоке позволяет выполнять расчеты непрерывного потока при обтекании воздухозаборника в постановке Эйлера и затем использовать полученные результаты для расчета движения дисперсных частиц в постановке Лагранжа.

Решена задача моделирования обтекания воздухозаборника НАСА 1-70-50 непрерывным потоком сжимаемого, вязкого турбулентного газа.

Результаты решения показаны в сравнении с экспериментом и вычислениями панельным методом.

Выявлено, что решение задачи распределения давления по внешней поверхности обечайки воздухозаборника в ПК Star-CCM+ и Ansys CFX совпадает с экспериментом с отклонением до 5% для режимов течения $V_i/V_0 = 0,428$ и $V_i/V_0 = 0,216$.

Решение задачи позволяет выявить визуальную картину течения, линии тока и распределение давления в расчетной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еникеев Г. Г. Математические модели эффективности роторных воздухоочистителей ВРД // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков: ХАИ, 2006. С. 33–37.
2. Защита ГТД от морских аэрозолей с помощью роторных воздухоочистителей / Г. Г. Еникеев, Р. М. Гузаиров, В. Л. Химич, Г. З. Шарипов // Сборник тр. Уфимск. ордена Ленина авиац. ин-та имени Серго Орджоникидзе. Уфа: УАИ, 1992. С. 132–151.
3. Гузаиров А. Р., Еникеев Г. Г. Динамика твердых частиц пыли в ступени роторного воздухоочистителя // Проблемы и перспективы развития двигателестроения в поволжском регионе: тез. докл. междунар. научно-техн. конф., посвященной 55-летию Самарск. гос. аэрокосмич. ун-та. Самара: СГАУ, 1997.
4. Бичер Б., Табаков У., Хамед А. Усовершенствованный метод расчета траекторий частиц угольной золы в турбомашине // Тр. амер. об-ва инженеров-механиков. Сер. А, Энергетические машины и установки. 1982. №1. С. 43–47.

5. Защита ГТД от морских аэрозолей с помощью роторных воздухоочистителей / Г. Г. Еникеев, Р. М. Гузаиров, В. Л. Химич, Г. З. Шарипов // Сборник трудов УАИ. Ч. 1. Уфа: УАИ, 1992. С. 132–151.

6. Численные методы в динамике жидкостей / Э. Джеймсон и др., под ред. Вирц Г., Смолдерен Ж. М.: Мир, 1981. 407 с.

ОБ АВТОРАХ

Еникеев Галей Гумерович, доц. каф. прикл. гидромех. (ПГМ) УГАТУ. Дипл. инж.-мех по авиац. двиг. (УАИ, 1967). Канд. техн. наук по тепл. двиг. (УАИ, 1979), доцент. Иссл. в обл. механики многофазных сред.

Бикмеев Александр Тимерзянович, доц. каф. высокопроизводительных вычислительных технологий и систем (ВВТиС) УГАТУ. Дипл. физика (БГУ, 1995). Канд. физ.-мат. наук по физике конденсированного состояния (УГАТУ, 2002) Иссл. в обл. физики трения.

Соловьев Алексей Александрович, ст. преп. каф. ПГМ. Дипл. магистр техники и технологий по энергомашиностр. (УГАТУ, 2005). Канд. техн. наук по гидравл. машинам и гидропневмоагр. (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. газодинамики и термодинамики закрученных и многофазных потоков.

Касаткин Алексей Александрович, ст. преп. каф. ВВТиС. Дипл. инж.-матем. (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. диф. уравнений.

Юлмухаметов Константин Раисович, мл. науч. сотр. ИКИ НИЧ УГАТУ, дипл. физика (БГУ, 2003). Иссл. в обл. моделирования физических процессов.