

УДК 681.586'325

В.Н.Моисеев, И.П. Ефимов, М.Ю. Сорокин, А.А. Павловский

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИЕМНИКА ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ ППД-С1

Моисеев Владимир Николаевич, аспирант Ульяновского государственного технического университета, окончил экономико-математический факультет Ульяновского государственного технического университета по специальности «Прикладная математика». Инженер расчетно-теоретического отдела ОАО «УКБП». Имеет статьи, изобретения в области зондовых средств восприятия давлений аэрометрических систем летательных аппаратов. [e-mail: v.n.moiseev@mail.ru].

Ефимов Иван Петрович, кандидат технических наук, окончил Ульяновский политехнический институт по специальности «Авиаприборостроение». Доцент кафедры «Измерительно-вычислительные комплексы» Ульяновского государственного технического университета. Имеет статьи, изобретения в области первичных преобразователей давления аэрометрических систем летательных аппаратов. [e-mail: eip@ulstu.ru].

Сорокин Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, окончил факультет информационных систем и технологий Ульяновского государственного технического университета. Начальник отдела ОАО «УКБП». Имеет статьи, изобретения в области зондовых средств восприятия давлений аэрометрических систем летательных аппаратов. [e-mail: rto@ukbp.ru].

Павловский Александр Андреевич, окончил факультет самолетостроения Харьковского аэрокосмического университета. Начальник бригады ОАО «УКБП». Имеет изобретения в области зондовых средств восприятия давлений аэрометрических систем летательных аппаратов. [e-mail: rto@ukbp.ru].

Аннотация

Проведено сравнение результатов моделирования и экспериментальных исследований бортового приемника полного давления ППД-С1. Получена оценка применимости программы моделирования течения газа OpenFOAM для задачи обтекания приемника полного давления. Рассмотрено влияние скоса потока на величину погрешности воспринимаемого полного давления.

Ключевые слова: математическое моделирование, приемник полного давления, модель турбулентности.

Vladimir Nikolaevich Moiseev, post-graduate student at Ulyanovsk State Technical University; graduated from the Faculty of Economics and Mathematics of Ulyanovsk State Technical University in the profession 'Applied Mathematics'; engineer at a calculation and theory department of Ulyanovsk Instrument Manufacturing Design Bureau, PJSC; author of articles, inventions in the field of air pressure probes of aircraft airdata measuring systems. e-mail: v.n.moiseev@mail.ru.

Ivan Petrovich Efimov, Candidate of engineering sciences, has graduated from the Ulyanovsk Polytechnical Institute with a speciality "Aircraft instrument engineering". The senior lecturer of Measuring and Computing Complexes Department of Ulyanovsk State Technical University. He has articles, inventions in the field of primary pressure sensors of aircraft airdata measuring systems.

Mikhail Yuryevich Sorokin, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Information Systems and Technology of Ulyanovsk State Technical University; head of a department at Ulyanovsk Instrument Manufacturing Design Bureau, PJSC; author of articles, inventions in the field of air pressure probes of aircraft airdata measuring systems. e-mail: rto@ukbp.ru.

Alexander Andreevich Pavlovsky, graduated from the Faculty of Aircraft Construction of Kharkov Space University; head of a crew at Ulyanovsk Instrument Manufacturing Design Bureau, PJSC; author of inventions in the field of air pressure probes of aircraft airdata measuring systems. e-mail: rto@ukbp.ru.

Abstract

The article compares results of a simulation and an experimental study of the onboard total air pressure head ППД-С1 and evaluates the applicability of a simulation software for gas flow OpenFOAM for a task of total air pressure head. The paper also considers impact of flow skew to measurement error of total pressure.

Keywords: simulation, total pressure head, turbulence model.

ВВЕДЕНИЕ

Для автоматизированного и автоматического управления летательными аппаратами необходимо получение информации о высоте и скорости полета, которые рассчитываются на основе информации о полном и статическом давлении набегающего воздушного потока. Аналогичная задача возникает при автоматизации управления технологическими процессами, где необходимо контролировать скорость и давление газовых потоков. Восприятие давлений газовых потоков осуществляется с помощью приемников воздушных давлений. В отличие от других приемников приемник полного давления (ППД) воспринимает в полете только полное воздушное давление [1].

Целями данной работы являются проведение математического моделирования приемника полного давления ППД-С1, сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, полученными специалистами ФГУП «ЦАГИ» [2], оценка погрешности математического моделирования при различных скоростях и углах скола набегающего потока. Данная оценка погрешности математического моделирования позволит выявить случайную и систематическую составляющие погрешности и прогнозировать погрешность математического моделирования аналогичных приемников полного давления.

В целом можно уменьшить число дорогостоящих экспериментальных исследований за счет проведения математического моделирования с заранее прогнозируемой погрешностью.

ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО ПРИЕМНИКА, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводились в аэродинамической трубе т-129 ФГУП «ЦАГИ» с насадком-имитатором струи, обеспечивающим скорость потока до 530 км/ч. Сжатый воздух к соплу насадка подавался от стационарной сети, давление воздуха регулировалось в зависимости от требуемой скорости воздушного потока на выходе из аэродинамического канала (диапазон скоростей 100...530 км/ч обеспечивается при давлениях 0,5...8 атм). Для сглаживания потока по скорости и разрушения больших вихревых структур в насадке были установлены хонейкомб и ряд сеток. В процессе эксперимента скорость потока отслеживалась с помощью эталонного приемника полного давления ПД-120 (диапазон измеряемых скоростей от 0 до 0,3 М, коэффициент по скоростному напору меньше 0,1); температура воздуха измерялась термометром сопротивления [2].

Сечение приемника полного давления ППД-С1 приведено ниже на рисунке 1. Приемник ППД-С1 имеет цилиндрическую воспринимающую часть и коническую камеру торможения.

В процессе эксперимента контролировались следующие параметры: скорость потока, фиксируемая эталонным датчиком; угол между направлением потока и осью исследуемого приемника полного давления; плотность воздуха.

расчеты проводились с помощью программы openFoAM [3], которая применяется для моделирования течения жидкости и газа. Код OpenFOAM разработан в Великобритании в компании OpenCFD, Limited, и используется многими конструкторскими бюро и промышленными предприятиями более 12 лет. В основе кода лежит набор библиотек, предоставляющих инструменты для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных как в пространстве, так и во времени. рабочим языком кода является ООП С++. В терминах данного языка большинство математических дифференциальных и тензорных операторов в программном коде (до трансляции в исполняемый файл) уравнений может быть представлено в удобочитаемой форме, а метод дискретизации и решения для каждого оператора может быть выбран уже пользователем в процессе расчета. таким образом в коде полностью инкапсулируются и разделяются понятия расчетной сетки (метод дискретизации), дискретизации основных уравнений и методов решения алгебраических уравнений. В процессе моделирования использовался решатель simpleFoam - стационарная программа решения для турбулентного течения неньютоновой жидкости. При вычислении не учитывались шероховатость поверхности и крепление приемников к поверхности летательного аппарата. Исходными данными для математического моделирования являлись скорость потока, угол между направлением потока и осью ППД, а также плотность воздуха в соответствии с проведенными экспериментами. Использовалась тетраэдральная сетка с призматическим слоем вблизи поверхности приемника для учета пограничного слоя. В целом параметр y^+ не превышал 1, что является показателем правильного описания процессов в пограничном слое. Для сравнения выбраны наиболее популярные модели турбулентности: SpalartAllmaras, kOmegaSST, LienCubicKE, NonlinearKE, realizableKE, RNGkEpsilon. Проводилось сравнение результатов моделирования с данными, полученными после эксперимента.

В процессе математического моделирования рассчитывалось динамическое давление P^* в камере торможения.

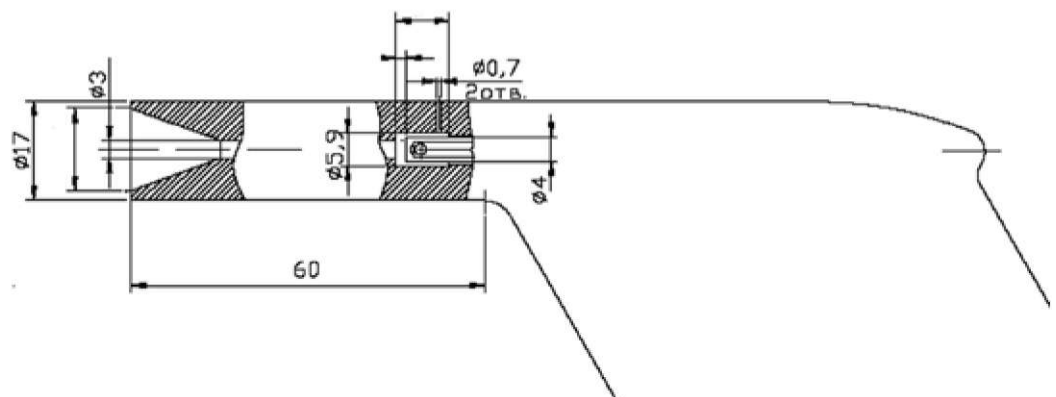


рис. 1. Сечение приемника ППД-С1

ния приемника как разность между полным P_n и статическим давлением $P_{ст}$:

$$P_D = P_n - P_{ст} \quad [Па]. \quad (1)$$

Приборная скорость U_{np} вычислялась по формуле:

$$U_{np} = \sqrt{\frac{P_D}{\rho}} \quad (2)$$

где P_D - динамическое давление потока, полученное с учетом полного давления, воспринимаемого исследуемым приемником, Па.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Абсолютная погрешность математического моделирования AU рассчитывалась как разность между вычислен-

ной скоростью U_n и скоростью набегающего потока U , фиксируемой исследуемым приемником:

$$AU = U_{np} - U, \quad [м/с]. \quad (3)$$

Относительная погрешность математического моделирования вычислялась по формуле:

$$\delta U = (AU/U) \cdot 100\%, \quad [\%]. \quad (4)$$

Результаты эксперимента и математического моделирования приемника ППД-С1 приведены в таблицах 1, 2 и на рисунках 2, 3: α - угол скоса потока [град], U - измеренная скорость в эксперименте или вычисленная при математическом моделировании [м/с], AU - абсолютная погрешность математического моделирования [м/с].

Таблица 1

Результаты эксперимента и математического моделирования приемника полного давления ППД-С1 при скорости набегающего потока ~74 м/с и моделях турбулентности SpalartAllmaras, kOmegaSST, LienCubicKE

Alfa, °	Эксперимент	Математическое моделирование					
		Модели турбулентности					
		SpalartAllmaras		kOmegaSST		LienCubicKE	
$U, м/с$	$U, м/с$	$AU, м/с$	$U, м/с$	$AU, м/с$	$U, м/с$	$AU, м/с$	
0	74,1	75,0	0,9	73,7	-0,4	73,4	-0,7
5	74,0	75,0	1,0	73,5	-0,5	73,2	-0,9
10	73,9	75,9	2,0	73,8	-0,1	73,5	-0,5
15	74,4	76,1	1,7	74,2	-0,2	73,9	-0,4
20	74,0	76,0	2,0	73,7	-0,3	73,7	-0,2
25	73,1	75,1	2,0	73,8	0,6	73,0	-0,1
30	70,9	72,5	1,6	71,4	0,4	70,8	-0,1
35	68,9	69,7	0,9	69,3	0,4	68,5	-0,3
40	66,5	66,4	-0,2	66,7	0,2	65,1	-1,4
45	62,6	61,5	-1,2	61,6	-1,1	61,2	-1,4
50	56,3	54,2	-2,1	55,6	-0,7	52,8	-3,5
55	50,1	46,2	-3,9	48,4	-1,7	46,0	-4,1
60	40,5	34,0	-6,5	34,4	-6,1	37,1	-3,4

таблица 2

Результаты эксперимента и математического моделирования приемника полного давления ППД-С1 при скорости набегающего потока ~74 м/с и моделях турбулентности NonlinearKE, realizableKE, RNGkEpsilon

Alfa, °	Эксперимент	Математическое моделирование					
		Модели турбулентности					
		NonlinearKE		realizableKE		RNGkEpsilon	
$U, м/с$	$U, м/с$	$AU, м/с$	$U, м/с$	$AU, м/с$	$U, м/с$	$AU, м/с$	
0	74,1	73,4	-0,7	73,5	-0,6	74,4	0,3
5	74,0	73,5	-0,6	73,3	-0,7	74,7	0,7
10	73,9	73,6	-0,3	72,6	-1,3	75,2	1,3
15	74,4	72,5	-1,8	72,3	-2,0	75,6	1,3
20	74,0	73,3	-0,7	73,7	-0,3	76,0	2,0
25	73,1	73,3	0,1	73,6	0,4	75,6	2,4
30	70,9	70,4	-0,5	70,7	-0,3	72,9	2,0
35	68,9	68,7	-0,2	68,4	-0,5	70,2	1,4
40	66,5	65,9	-0,6	65,7	-0,8	67,1	0,6
45	62,6	60,4	-2,2	62,1	-0,5	62,8	0,2
50	56,3	53,5	-2,7	56,1	-0,2	56,1	-0,2
55	50,1	46,5	-3,5	48,5	-1,6	48,5	-1,6
60	40,5	33,5	-7,0	38,5	-2,1	37,5	-3,0

При различных диапазонах углов скоса потока отдельные модели турбулентности показывают наилучшие результаты. Для выбора модели турбулентности, которую целесообразно было бы использовать при моделировании приемников полного давления, определена максимальная по модулю величина относительной погрешности для нескольких диапазонов углов атаки (таблица 3, жирным шрифтом выделены значения минимальной по модулю величины относительной погрешности для каждого диапазона углов атаки).

лучшие модели турбулентности для приемника ППД-С1 (скорость ~74 м/с) при углах атаки: нулевых - RNGkEpsilon; до 10° - kOmegaSST; до 20° - kOmegaSST; до 30° - kOmegaSST; до 40° - kOmegaSST; до 50° - kOmegaSST; до 60° - realizableKE.

Наиболее универсальной моделью является kOmegaSST, так как ее использование при моделировании в пакете OpenFOAM обеспечивает наилучшую сходимость расчетных и экспериментальных данных для всех диапазонов углов скоса потока. Использование других моделей турбулентности в отдельных случаях позволяет получить результаты с меньшей погрешностью, однако такие случаи не поддаются систематизации и не могут быть спрогнозированы заранее. Исходя из вышеизложенного, при дальнейших расчетах рекомендуется применять модель турбулентности kOmegaSST, как наиболее подходящую для решения задач моделирования приемников полного давления при заданных параметрах набегающего воздушного потока.

Абсолютная погрешность моделирования приемника ППД-С1 при скорости набегающего потока ~74 м/с во всем угловом диапазоне изменения углов скоса потока:

- модель SpalartAllmaras: от минус 7,06 м/с до 2,02 м/с;
- модель kOmegaSST: от минус 4,07 м/с до 0,87 м/с;
- модель LienCubicKE: от минус 4,07 м/с до минус 0,1 м/с;

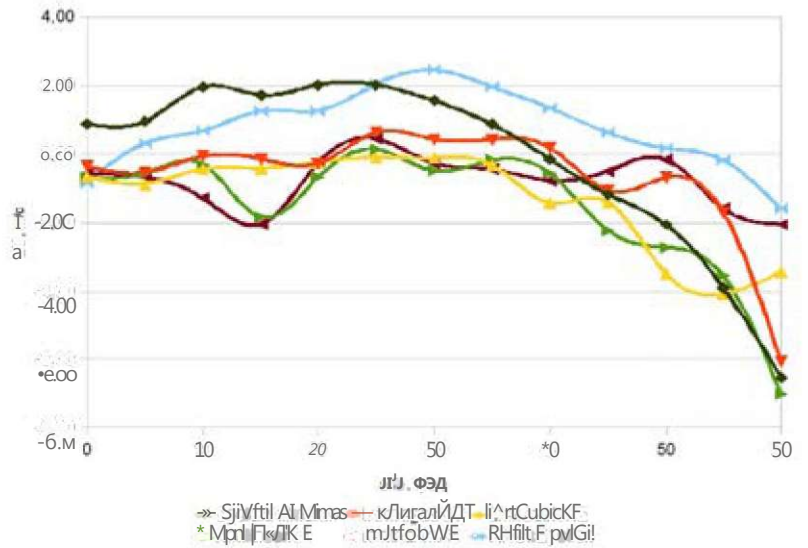


рис. 2. Зависимость абсолютной погрешности моделирования AU от угла набегающего потока alpha, скорость потока ~74 м/с

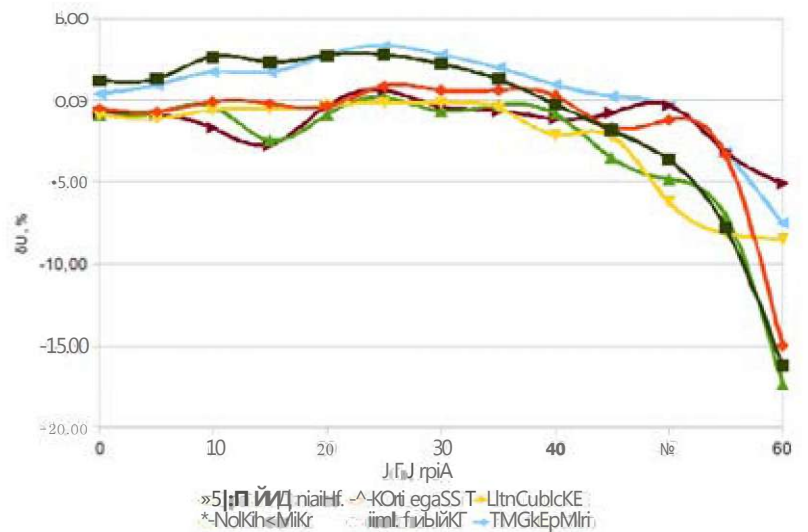


рис. 3. Зависимость относительной погрешности моделирования 5U от угла набегающего потока alpha, скорость потока ~74 м/с

- модель NonLinearKE: от минус 7,02 м/с до 0,13 м/с;
- модель realizableKE: от минус 2,42 м/с до 0,44 м/с;
- модель RNGkEpsilon: от минус 3,05 м/с до 2,44 м/с.

таблица 3

Максимальная относительная погрешность математического моделирования в зависимости от диапазонов изменения углов скоса потока при скорости набегающего потока 74 м/с

Угол, °	Относительная погрешность, %					
	SpalartAllmaras	kOmegaSST	LienCubicKE	NonlinearKE	realizableKE	RNGkEpsilon
0	1,19	-0,51	-0,91	-0,94	-0,81	0,41
От 0 до 10	2,65	-0,74	-1,18	-0,94	-1,74	1,75
От 0 до 20	2,65	-0,74	-1,18	-2,48	-2,75	2,75
От 0 до 30	2,76	0,85	-1,18	-2,48	-2,75	3,34
От 0 до 40	2,76	0,85	-2,15	-2,48	-2,75	3,34
От 0 до 50	-3,65	-1,71	-6,22	-4,85	-2,75	3,34
От 0 до 60	-16,12	-14,96	-8,51	-17,32	-5,07	-7,52

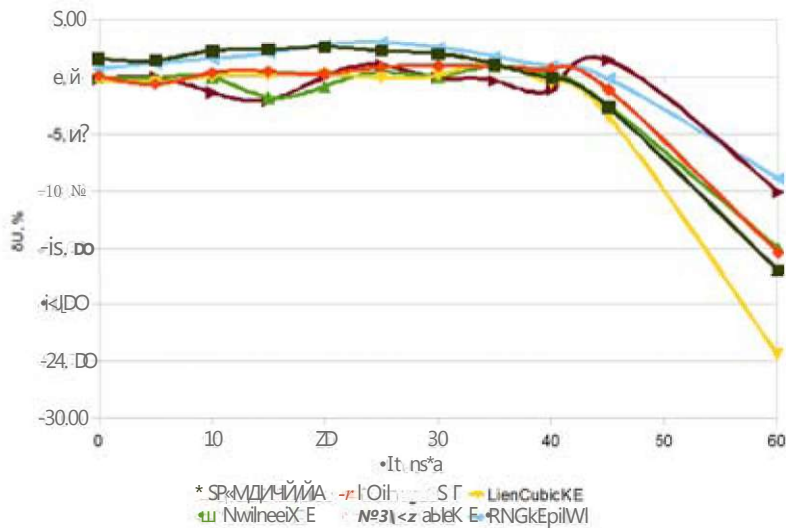


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности моделирования 5U от угла схода потока alpha, скорость потока ~100 м/с

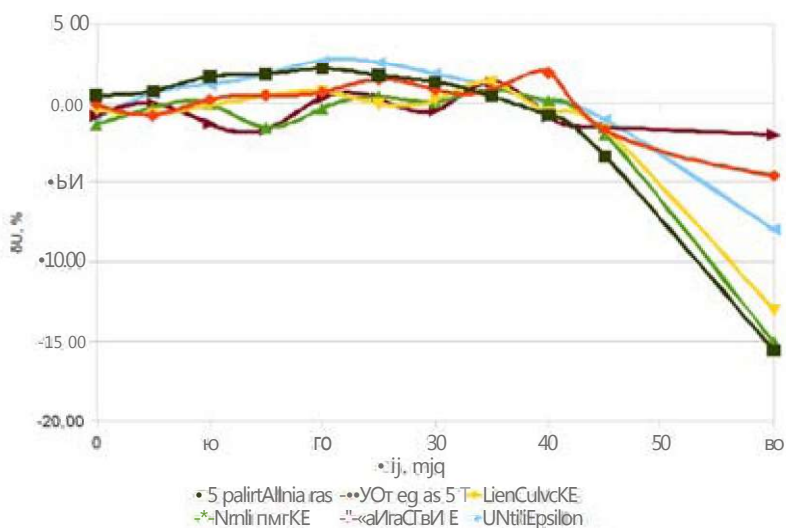


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности моделирования 5U от угла схода потока alpha, скорость потока ~148 м/с

Для сравнения приведены результаты относительной погрешности математического моделирования при скорости набегающего потока ~100 и ~148 м/с (рис. 4 и 5). Результаты моделирования для этих скоростей дают схожие данные по погрешностям и в этой работе не приводятся. Полученные результаты математического моделирования приемника воздушного давления при углах схода потока от 0 до 45 градусов соответствуют исследованиям специалистов ФГУП «ЦАГИ» с относительной погрешностью моделирования до 4%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе математического моделирования получены результаты сравнительного тестирования моделей турбулентности SpalartAllmaras, kOmegaSST, LienCubicKE, NonlinearKE, realizableKE, RNGkEpsilon при решении задачи обтекания приемника полного давления. Сравнение производилось по приборной скорости, измеренной в экспериментах и вычисленной по результатам математи-

ческого моделирования, при различных углах и скоростях набегающего потока.

Результаты математического моделирования приемника полного давления ППД-С1 при различных скоростях набегающего потока соответствуют экспериментальным исследованиям специалистов ФГУП «ЦАГИ» с относительной погрешностью моделирования до 4% при углах схода потока от 0 до 45 градусов. Расхождение с экспериментальными данными становится более заметно при углах схода потока свыше 45 градусов, что объясняется необходимостью перехода на другие модели в зависимости от зоны моделирования, однако это значительно усложнит математическое моделирование. Наиболее подходящей по совокупности проведенных исследований для задач моделирования приемников полного давления в воздушном потоке является модель турбулентности kOmegaSST, которая дает минимальные случайные и систематические погрешности. Данную модель можно рекомендовать к использованию при моделировании аналогичных приемников.

В целом получены удовлетворительные результаты математического моделирования ППД (максимальное расхождение при нулевом угле схода потока 1,19%), отработана технология решения подобных задач, что в дальнейшем позволит проектировать подобные ППД с заданными характеристиками, получаемыми в процессе математического моделирования. Результаты проделанной работы показали, что при проектировании приемников давления с прогнозируемыми характеристиками возможно использование результатов математического моделирования с применением программы OpenFOAM. Дальнейшая работа будет направлена на исследования по уменьшению погрешности математического моделирования для указанной модели турбулентности kOmegaSST, а также на проведение опытно-конструкторских работ, нацеленных на улучшение метрологических характеристик приемников полного давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев Г.И. Измерители аэродинамических параметров летательных аппаратов: учебное пособие / Г.И. Ключев, Н.Н. Макаров, В.М. Солдаткин, И.П. Ефимов; под ред. В.А. Мишина. - Ульяновск: УлГТУ, 2005. - 509 с.
2. Егоров И.В., Коновалов С.И., Миллер А.Б., Потопов Ю.Ф., Флакман Я.Ш. Определение погрешности восприятия полного давления приемниками ППД-С1, ППД-С1-вариант 1, ППД-1М, ПВД фирмы Harco. Научно-технический отчет. - Жуковский: ФГУП «ЦАГИ», 2010. - 29 с.
3. Официальный сайт программы OpenFOAM. - Режим доступа: www.openfoam.com.