

СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ АЭРОГАЗОТЕРМОДИНАМИКИ С НЕПОДВИЖНЫМИ И ДВИЖУЩИМИСЯ ГРАНИЦАМИ.

SIMULATING SYSTEM NONSTEADY PROBLEMS OF AEROGASTHERMODYNAMICS WITH IMMOVABLE AND MOVABLE BOUNDARIES

Mag. sc. ing. N. Sidenko, Mag. sc. ing. G. Filipsons
Riga Technical University, Aeronautics Institute
1 Kalku Str., Riga, Lv-1658, Latvia

Abstract: On the basis of package CAD/CAE of programs the simulating complex is developed for numerical model operation of nonsteady problems hydrotermogas dynamics, research experiments and optimization of parameters of aerodynamic plant subject to dynamics of their movable parts. Features of simulation technique of the specified class of applied problems are viewed. Results of numerical calculations which testify to ample opportunities of the developed complex are presented. Results of comparison calculation and experimental are given.

KEYWORDS: PULSATING FLOW, AIRSCREW, NAVIER-STOKES EQUATION, HEAT TRANSFER, SUBMERGED JET

1. Введение

Современные аэродинамические исследования в аэродинамических трубах и газодинамических стендах относятся к числу дорогостоящих и сложных экспериментов. К настоящему времени в мире достигнут, значительный прогресс в области вычислительной аэро-газо-термодинамики (CFD), который инициировал развитие методов компьютерного моделирования, эксперимента и анализа аэрогазодинамических и тепловых процессов.

Объединение специально подобранных CFD программ с пакетами графического проектирования CAD позволяет на базе современных персональных компьютеров создать достаточно гибкую систему компьютерного моделирования для решения определенного класса промышленных задач, что соответственно позволит частично заменить, физический эксперимент компьютерным. Необходимо отметить, что методики компьютерного эксперимента существенно зависят от класса задач и поэтому требуют специальной разработки.

В системах компьютерного моделирования остро нуждаются промышленность и фирмы-разработчики, так как использование таких систем позволяет снизить финансовые и временные затраты за счет сокращения объема физического аэрогазодинамического эксперимента.

Цель работы – разработка методик компьютерного моделирования и численного решения нестационарных прикладных задач гидро-газо-термодинамики, исследовательских экспериментов и оптимизации параметров аэродинамических установок с учетом динамики их подвижных механических элементов.

2. Предпосылки и средства для решения проблемы

Разрабатываемая CAD/CAE/CFD система компьютерного моделирования нестационарных инженерных задач аэро-газо-термодинамики предназначена для решения следующего круга инженерных задач:

- 1) расчет нестационарных характеристик лопастных воздуходувок со стационарными и низкочастотными пульсациями параметров в газодинамическом канале или пневматической сети;
- 2) расчет теплообмена и аэродинамических параметров тел в пульсирующем газовом потоке;
- 3) расчет аэродинамических установок для полета человека в вертикальной затопленной струе большого диаметра создаваемых с помощью аэродинамических винтов.

Для геометрического моделирования и численных расчетов, рассматриваемых задач, используется интегрированный комплекс CAD/CAE программ. Все геометрические модели создаются с помощью CAD программы SolidWorks [1]. В качестве CAE программ, предназначенных для расчета термогазо-динамических параметров, использованы программы COSMOS FloWorks [1] и CFDesign [2].

Программа COSMOS FloWorks полностью интегрирована в CAD программу SolidWorks, а CFdesign интегрирована в качестве дополнительного модуля.

Программа Cosmos FloWorks позволяет достаточно быстро и с удовлетворительной точностью решать нестационарные задачи обтекания трехмерных тел, а также исследовать внутренние течения с учетом или без учета процессов теплообмена. Для рассматриваемого типа задач конвективного теплообмена программа позволяет исследовать течения как несжимаемого, так и слабо сжимаемого газа, температура которого может значительно отличаться от температуры тела.

Программа CFdesign обладает более широкими возможностями решения задач с перемещающимися в потоке телами и движущейся твердой границей. Для моделирования заданного или индуцированного движения тел в газовом потоке программа имеет специализированный блок "Motion", который использует подвижную адаптивную сетку конечных элементов и при расчете не требует их фиксации подвижных механических элементов. Кроме аэродинамических характеристик и детальной картины обтекания, программа CFdesign позволяет, например, определять силу тяги и крутящий момент на валу винта, а также вычислять соответственно безразмерные коэффициенты тяги, мощности и полезного действия.

Математические модели движущегося газового потока в выбранном классе задач описываются с помощью уравнений Навье-Стокса [1,2] для сжимаемой жидкости с учетом процессов теплообмена. Эти уравнения в нестационарной постановке являются законами сохранения массы, импульса и энергии движущейся среды. Уравнения моделируют турбулентные, ламинарные и переходные течения. Для турбулентных течений используются дополнительные уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и ее диссипации. Для дискретизации области расчета и анализа теплообмена неподвижных тел в движущейся среде в программе Cosmos FloWorks в отличие от программы CFdesign использован метод конечных объемов с прямоугольной сеткой, что обеспечивает универсальность и простоту ее использования. В процессе расчета сетка конечных объемов измельчается по заданному закону в зонах предполагаемых больших градиентов каждой из зависимых переменных или в

зонах значительного изменения кривизны поверхности твердого тела.

Основными критериями при выборе программных пакетов являлись функциональность, быстродействие, потребный объем оперативной памяти, удобство и простота использования. Для расчетов рекомендуется использовать компьютеры с оперативной памятью ≥ 3.5 Гб.

2. Решение рассматриваемой проблемы

В качестве примера методики решения *первой задачи*, рассматривалась экспериментальная сушильная установка разработанная фирмой ENDO IMPULSS (Рига, Латвия) [3], которая предусмотрена для конвективной сушки сыпучих материалов. На основании проекта сушильной машины, представленной фирмой ENDO IMPULSS, а также особенностей выбранных программ и методики их реализации, были разработаны упрощенные геометрические модели газодинамического тракта сушильной машины (рис.1), центробежного нагнетателя воздуха (воздуходувки) и роторного генератора газодинамических импульсов (пульсатор). Газодинамические расчеты выполнялись в программе CFdesign.

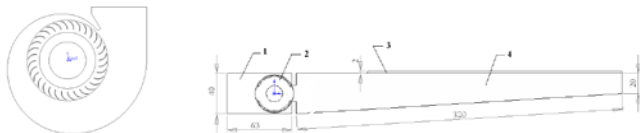


Рис.1. Расчетная схема пульсатора с сушильной камерой и моделью дисперсного материала

1 - теплообменник; 2 – пульсатор; 3- модель дисперсного материала; 4- газораспределительная камера.

Разработка компьютерной модели центробежного нагнетателя типа В-Ц14-46-5 с лопатками рабочего колеса, загнутыми вперед, обусловлена необходимостью исследования нестационарных характеристик воздуходувки, работающей на сеть с пульсирующим потоком воздуха. Пульсации расхода в сети создаются специальным роторным пульсатором (частота пульсаций $\omega \sim 2\pi(10 \dots 20)$ рад/сек).

Сетка сушильной камеры вместе с расположенным на ней дисперсным материалом, приблизительно моделируются пористым слоем заданной толщины с соответствующим коэффициентом пористости. Величина падения давления в слое зависит от его толщины и пористости. Отметим, что упрощение геометрической модели производится, в основном, с целью уменьшения времени счета и предотвращения чрезмерного измельчения расчетной сетки вблизи элементов с малым радиусом кривизны (например, вблизи выходных отверстий пульсатора или лопаток рабочего колеса воздуходувки). Сетка конечных элементов выбиралась неравномерной и измельчалась в зонах предполагаемых больших градиентов каждой из зависимых переменных. Пример расчетной сетки показан на рис. 2.

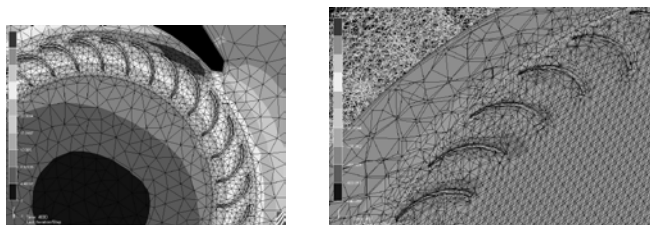


Рис. 2. Пример расчетной сетки.

При анализе течения с вращающимися устройствами необходимо создавать не только геометрическую модель тела, но и так называемый вращающийся регион [2].

Динамические характеристики псевдооживленного слоя, а также аэроупругие характеристики газораспределительной сетки в данной модели не рассматривались.

Для расчета плоской (двухмерной) модели рассматриваемой установки требуется от 5000 до 50000 узлов сетки, а для вариантов трехмерной модели от 150000 до 1500000 узлов сетки. Если компьютерная модель содержит вращающиеся устройства (в данном случае пульсатор или рабочее колесо воздуходувки), то такая задача рассматривается как нестационарная и требует обязательного задания шага по времени. В программе CFdesign шаг по времени определяется автоматически после задания угловой скорости устройства и рассчитывается таким образом, чтобы за один шаг устройство повернулось, например, на три градуса. В процессе расчета динамика поворота вращающихся устройств отображается на мониторе компьютера одновременно с нестационарной картиной распределения визуализируемого параметра [2].

Цель решения *второй задачи*, заключалась в разработке методики расчета, позволяющей определить условия и физические причины влияния низкочастотных (периодических) пульсаций скорости газового потока на теплообмен частицы, а также оценить возможности управления процессом теплообмена и его интенсификации. Для математического моделирования движения среды и теплообмена использовались нестационарные уравнения Навье-Стокса. Для численного решения системы уравнений в программе Cosmos FloWorks используется метод конечных объемов с адаптивной прямоугольной сеткой [1].

Рассматривались одиночные цилиндрические частицы большого удлинения, когда влиянием концевых эффектов можно пренебречь. Эта простая задача позволяет изучить основные особенности физики процесса и установить характер влияния пульсаций потока на теплообмен. Известно [12-14], что детальные исследования закономерностей теплообмена одиночной частицы являлись базой для анализа сушки пульсирующим потоком в кипящем или продуваемом неподвижном слое частиц.

Анализировалось влияние внешнего потока с периодическими импульсами скорости синусоидального типа (рис.3):

$$V(t) = 1.45 \cdot (1 + A \sin(2\pi f t)) \text{ м/с}, \quad (1)$$

$$V(t) = (0.08 + A_1 \sin^2(2\pi f t)) \text{ м/с}, \quad (2)$$

Здесь V скорость потока, t – время, A – амплитуда пульсаций, f – частота пульсаций, $A = 0.5$ и $A_1 = 2.74$.

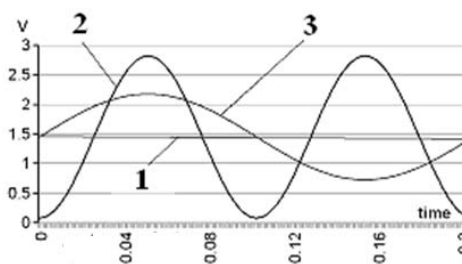


Рис. 3. Профили скорости потока: 1 – средняя скорость; 2,3 – скорости, определяемые выражениями (1), (2)

Средняя во времени скорость потока во всех случаях одинакова и равна $V_0 = 1.45$ м/с. Для этой скорости среднее число Рейнольдса $Re_0 = V_0 D / \nu = 1000$, где $\nu = 0.000145 \text{ м}^2/\text{с}$ – кинематический коэффициент вязкости воздуха.

В расчетах был исследован диапазон величин средних чисел Рейнольдса $10^2 < Re_0 < 10^5$, частот пульсаций потока $0 \leq f < 100$ Гц, безразмерных амплитуд пульсаций потока $0 \leq A < 1$.

Рассматривались цилиндрические частицы двух диаметров $D = 0.01 \text{ м}$ и $D = 0.10 \text{ м}$, которые помещались в не нагретый (20°C) или нагретый (120°C) поток воздуха.

Область численного расчета (домен), в которую помещается исследуемая частица, имеет размеры, значительно превышающие размеры частицы. Это позволяет исключить

возможное влияние границ расчетной области при исследовании отрывных течений за частицей (рис.4).

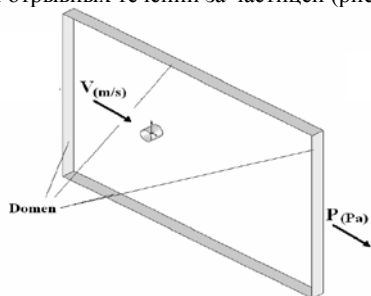


Рис.4. Домен с исследуемым цилиндром бесконечного размаха.

Результаты проверочных численных расчетов зависимостей среднего по времени коэффициента лобового сопротивления цилиндрической частицы $<C_x>$ и безразмерной частоты отрыва вихрей Sh_0 дорожки Кармана, выполненные авторами данной работы, достаточно хорошо согласуются с известными экспериментальными данными [5].

Для решения *третьей задачи* было необходимо разработать методику расчета и оптимизации параметров аэродинамических установок различных модификаций предназначенных для создания вертикальных затопленных струй большого диаметра с помощью одного или нескольких аэродинамических винтов. Основное назначение этих установок – использование их в качестве тренировочной базы для обучения навыкам свободного полета, а также в качестве спортивно – развлекательных аттракционов для широкой публики и место организации спортивных шоу [6].

Были рассмотрены несколько вариантов конструкций (см. рис. 6А – 6Д), для которых с целью оптимизации определялись их аэродинамические характеристики. Анализ геометрии и выходных аэродинамических параметров показал, что наилучшим из представленных на рис.6А – 6Д является вариант, показанный на рис.6Д.

В спроектированной и исследованной компьютерной модели трубы (рис.6Д) вертикальную воздушную струю создают пять серийных пятилопастных винтов диаметром 1.8м, горизонтальные оси которых симметрично расположены по окружности вдоль ее радиусов. Каждый винт установлен в спрофилированное кольцо, которое за винтом переходит в трехмерный профилированный канал сложной Г-образной формы для плавного и безотрывного поворота потока на 90° параллельно вертикальной оси установки. После завершения поворота все пять каналов объединяются в одно осесимметричное сопло диаметром ~3.6м, формирующее свободную струю.

Для численного решения данной задачи тоже использовалась исходная система нестационарных уравнений Навье - Стокса с дополнительными уравнениями, описывающими турбулентный перенос.

В зависимости от типа конструкции для удовлетворительной точности результатов решения задачи требуется сетка с 800 000 – 1 200 000 жидких и твердых элементов.

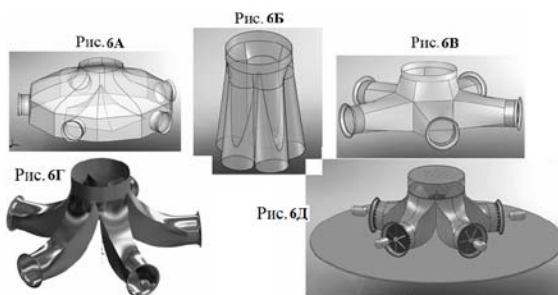


Рис. 6. Варианты конструкций аэродинамического стенда.

Необходимо отметить особенности численного расчета аэродинамических установок, создающих вертикальные затопленные струи большого диаметра с помощью аэродинамических винтов.

Вблизи быстро вращающегося аэродинамического винта расчетный шаг по времени должен быть равен сотым долям периода вращения винта, а характерный размер пространственной сетки конечных элементов – порядка миллиметров.

Процесс формирования потока в воздушном канале и в свободной струе – намного более медленный во времени и более крупномасштабный в пространстве, поэтому требуемый шаг по времени – десятые доли секунды и более, а размер конечноразностной сетки – дециметры и метры.

При учете указанных особенностей среднее время численного расчета задачи образования струи за винтом, продвижения потока в канале и истечения свободной вертикальной струи может достигать нескольких суток.

При этом следует учесть, что по сравнению с интегральными характеристиками винта – расходом и давлением за винтом, детальная картина и особенности течения вблизи винта более слабо влияют на параметры истекающей свободной струи.

Поэтому для упрощения процесса решения задачи винт целесообразно заменить его приближенной моделью, например, дисковой моделью. Выбор необходимой модели необходимо обосновать.

С этой целью вначале исследовались особенности формирования струи за винтом с входным устройством и коротким выходным цилиндрическим соплом (рис.7). Цель решения данной задачи – определить расход воздуха, протекающего через плоскость винта, а также оценить величину закрутки потока за винтом. Это позволит, приближенно заменить винт упрощенной моделью внутреннего вентилятора (дисковой моделью).

Дисковая модель имеет вид вращающегося пронцаемого для воздуха диска, который создает поток с заданными расходом и может вращаться с постоянной скоростью.

В результате, задача расчета аэродинамических параметров экспериментальной установки с моделью внутреннего вентилятора будет содержать в основном медленные во времени и крупномасштабные в пространстве процессы, что позволит существенно сократить время ее расчета.

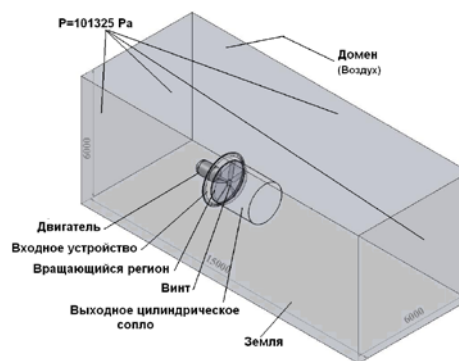


Рис. 7. Винт в коротком канале с входным устройством и выходным цилиндрическим соплом.

4. Результаты и дискуссия

Разработаны универсальные методики моделирования рассматриваемого класса прикладных задач.

В общем случае тип компьютерной модели и методика расчета зависят от конструкции исследуемой установки и характера движения ее механических элементов.

По разработанным в работе методикам пользователь создает геометрическую модель исследуемого тела, выбирает

математическую модель жидкой или газовой среды, задаёт материал тела и граничные условия, выбирает расчетный домен, задаёт расчетную сетку и методику контроля процесса счета, условия завершения и выхода из расчета, а также форму представления полученных результатов.

На основании разработанных методик произведено сопоставление результатов численного расчета характеристик центробежных воздуходувок с экспериментальными данными и расчетами, полученными другими авторами [8]. Показано, что пульсации параметров в пневматической сети влияют на выходные параметры воздуходувки. Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных подтверждает возможность использования рассматриваемой системы моделирования для решения данного класса инженерных задач [9].

Исследованы газодинамические параметры механических роторных пульсаторов, которые предназначены для создания потока с гармоническими пульсациями расхода. Пульсации расхода, создаваемые роторным пульсатором, генерируют пульсации скорости и давления, которые распространяются как вниз, так и вверх по течению. Возникающие пульсации давления влияют на параметры течения в системе нагнетания воздуха и могут инициировать вибрацию стенок канала газового канала [8].

Разработана, апробирована и оптимизирована методика компьютерного расчета аэродинамических характеристик и параметров теплопередачи единичных тел в нестационарном пульсирующем газовом потоке, температура которого может значительно отличаться от температуры частицы. В частности, для цилиндра установлено, что форма, амплитуда и частота пульсаций значительно влияют на коэффициенты лобового сопротивления, подъемной силы и теплообмена цилиндра, которые в этом случае тоже являются нестационарными пульсирующими величинами. Полученные результаты подтвердили возможность существенного влияния и управления теплообменом путем специального подбора частоты пульсаций, их амплитуды и формы [10].

Полученные результаты можно использовать при анализе воздействия периодических порывов ветра на инженерные конструкции, подвижные антенны радиолокаторов, для исследования влияния воздушных порывов на аэродинамические характеристики и устойчивость полетов сверхмалых беспилотных летательных аппаратов, а также для интенсификации процессов сушки гранулированных частиц в пульсирующем воздушном потоке.

Разработана методика расчета аэродинамических параметров установок, предназначенных для создания вертикальных затопленных струй большого диаметра с помощью одного или нескольких аэродинамических винтов. Методика позволяет рассчитывать аэродинамические параметры вращающегося винта, оптимизировать геометрию лопаток выпрямителя, анализировать аэродинамические параметры рабочего участка струи с учетом влияния геометрических элементов установки, влияния земли и ограничивающих стенок [11].

5. Выводы

Основной результат работы – скопирован универсальный компьютерный стенд, оснащенный необходимыми инженерными CAD/CAE программами, на котором обученный пользователь может моделировать, исследовать и оптимизировать сложные трехмерные нестационарные течения газа внутри и снаружи движущихся твердых тел и элементов машин. Данный стенд позволяет получить намного больше информации об исследуемых параметрах при значительно меньших финансовых затратах по сравнению с физическими экспериментальными стендами, в особенности, на начальных этапах разработки изделий, которые требуют многочисленных экспериментов при поиске оптимального варианта.

6. Литература

1. А.А. Алямовский и др., "SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике", Санкт-Петербург, 2005, -800 стр.
2. CFdesign v.9, User's guide, Copyright (C) Blue Ridge Numerics, Inc. 1992-2006
3. Patent of the Republic of Latvia LV 12929B (Int. Cl. 7F26133/10). Method for drying loose materials in fluidized bed, and fluid shock wave generator and dryer for realisation thereof. Publication date: 20.01.2003;
4. C.Hirsch, Numerical computation of internal and external flows. John Wiley&Sons, Chichester, 1988.
5. Williamsons C.H.K. Vortex dynamics in cylinder wake // Annual Review of Fluid Mechanics. 1969, 28, P. 477-539.
6. <http://www.verticalwind.com/>
7. Ushakov V., Sidenko N., "Численный анализ аэродинамических характеристик восстанавливаемого винта", 4 th International Conference on the Scientific Aspects of Unmanned Aerial Vehicles-2010, Poland, Kielce 5-7 May 2010, izd. Kielce University Of Technology Faculty of Mechatronics and Machine Building Chair of Information Technology and Armament Al. Tysiąclecia P.P. 7, 25-314 Kielce, Poland, 590-601 p.
8. V.Šakovs, N.Sidenko. "Zāvējamās mašīnas nestacionārās skaitliskās analīzes metodika". Mašīnzinātne un transports, Intelektuālais Transporta sistēmas 18. sējums, 2004.g. 11-13. oktobri, Latvija, Rīga.- Rīga: Izd. "RTU" 2005.g., 102-112. lpp.
9. J.Dolacis, V.Ushakov, K.Savicka, N.Sidenko, A.Engelbrehts, "Numerical and experimental analysis of physical processes at drying disperse capillary-porous materials by the pulsing air steam". Annals of Warsaw Agricultural University Forestry and Wood Tehnology, 2005.g. November 7-9., Poland, Rogow.- Warsaw: Izd. „Warsaw University of life sciences press” 2005.g., 396-400p.
10. V. Ushakov, V.Gopenko, G.Filipsons, N.Sidenko, "Numerical analysis of periodic pulsation interactions of external flow on cylinder's aerodynamics and heat-exchange. The Third World Congress "Aviation in the XXI-st Century"- Safety in Aviation and Space Technology 2008.g. 22-24 September, Ukraine, Kiev – Kiev: Izd. "National Academy of Sciences of Ukraine National Aviation University" 2008.g., 11.58-11.64p.
11. V. Ushakov, N.Sidenko, "Оптимизация аэродинамического генератора вертикальной воздушной струи для свободного полета человека", IX International Scientific and Technical Conference «The Improvement of The Quality, Reliability and Long Usage of Technical Systems and Technological Processes». Conference Dedicated 80 Years CIAM, december 12-19, 2010 Sharm El Sheikh (Egypt). 81-85 p. ISBN 978-966-330-106-8.
12. Kudra T., Benali M., Zbicinski I. Pulse Combustion Drying: Aerodinamics, Heat Transfer and Kinetics// Drying Technology, 2003. Vol. 21, No. 4, P. 629-655.
13. Акулич И.В., Куц И.С., Ноготов Е.Ф. Нестационарные волновые течения газозвеси с учетом фазовых превращений// Инженерно-физический журнал, 2000. т. 73, № 36, с. 487- 492.
14. Акулич И.В., Куц И.С., Ноготов Е.Ф. Нестационарные волновые течения газозвеси в условиях колебаний расхода газа и их влияние на теплообмен// Теоретические основы химической технологии, 2004. т. 38, № 5, с. 483- 489.