Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования

«Полоцкий государственный университет»

«Московский государственный технический университет МГТУ им. Н.Э. Баумана»

Д.Ф. Пастухов, Н.К. Волосова, Ю.Ф. Пастухов

ПОСТРОЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ МОДЕЛЕЙ

В ОБОЛОЧКЕ ANSYS FLUENT

Учебное пособие к лекционным и практическим занятиям

для студентов специальности

1-40 01 01 Программное обеспечение информационных технологий

1-98 01 01 Компьютерная безопасность

Новополоцк

ПГУ

2018

УДК 519.6 ББК 22.193

Рецензенты:

А.А. Козлов, кандидат физико-математических наук, доцент,
 Заведующий кафедрой высшей математики
 Полоцкого государственного университета

Пастухов Д.Ф., Волосова Н.К., Пастухов Ю.Ф.

Построение нестационарных моделей в оболочке ANSYS FLUENT: учебное пособие/Д.Ф. Пастухов, Ю.Ф. Пастухов, - 1 - ое изд., - Новополоцк: ПГУ, 2018. -46 с.

Материал учебного пособия соответствует требованиям Государственного образовательного стандарта по прикладной математике. В книге описаны две нестационарные задачи, построенные в программной оболочке ANSYS FLUENT с неподвижными стенками и вращающимися стенками.

Для студентов университетов, педагогических вузов, а также для студентов технических вузов, преподавателей, инженеров, программистов использующих в своей практической деятельности численные методы в прикладных задачах.

> УДК 519.6 ББК 22.193

© Оформление УО «Полоцкий государственный университет», 2018

Оглавление

Предисловие	4
Построение геометрии модели	5
Построение сетки модели	10
Численное решение задачи	13
ВРЕМЕННАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ В	
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ. А.А. Соловьёв, О.А. Сперанская, Д.Ф. Г	Іастухов,
Ю.Ф. Пастухов.	34
МОДЕЛИРОВАНИЕ БЫСТРОПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРЕРЫВАНИЯ ЖИДКОСТИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ В ОБОЛОЧКЕ ANSYS FLUENT	ПОТОКА
Сперанская О.А. Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Воло Московский государственный технический университет	осова Н.К. им
Н.Э.Баумана(г.Москва),Российская Федерация.Пастухов Д.Ф.,Пастухов Ю.Ф	Р.,Соловьёв

Радкевич Д.С. Полоцкий государственный

А.А., Голубева О.В., Ехилевский С.Г.,

университет, Республика Беларусь

40

Предисловие

Предлагаемое учебное пособие создано на основе чтения авторами курса лекций Численные методы в течение ряда лет в Полоцком государственном университете студентам специальности 1-40 01 01 (Программное обеспечение информационных технологий). В пособии рассмотрены две нестационарные задачи в программной оболочке ANSYS FLUENT с неподвижными стенками и вращающимися стенками прерывателя потока жидкости относительно общего основания. Задачи решены с двойной точностью, т.е. решатель переходит к следующей итерации, если относительные невязки всех переменных величин менее 0,1%. Предлагаемое пособие может быть использовано в качестве лабораторного практикума по численным методам и уравнениям математической физики.

Основная задача работ практикума заключается в проверке идей функционального и численного анализа на простых тестовых примерах. Работа по времени рассчитана на 4-6 академических часов. Из-за сложности геометрических границ модели и системы уравнений в частных производных от ANSYS FLUENT можно ожидать лишь второго порядка погрешности для нормы всех переменных в задаче. То есть решение задачи в ANSYS FLUENT не преследует цель достигнуть высокого порядка точности. Однако часто в практических задачах важно знать оценку физических величин с точностью хотя бы в несколько процентов. Этому требованию удовлетворяет программный продукт ANSYS FLUENT.

Можно сказать, что численный анализ вырос, как совокупность методов изучить законы поведения разности между аналитическим и численным значением различных математических объектов и методов попытки уменьшить эту разность. Но даже грубая качественная оценка изредка может принести пользу.

Пастухов Д.Ф., Н.К. Волосова, Пастухов Ю.Ф.

Рассмотрим три основных этапа построения нестационарных явлений в жидкости для программной оболочки Fluent WORKBENCH(Version 15.0.7) на примере быстро периодического прерывания потока жидкости под давлением.

1 Построение геометрии модели

1 шаг. Открыть программную оболочку ANSYS WORKBENCH. Нажать(ЛКМ) в функциональной линейке Fluid Flow(Fluent) и перетащить Fluid Flow(Fluent), не отпуская ЛКМ, в красный прямоугольник правого поля(Project Schematic), после инициализации справа в Project Schematic образуется проект A Fluid Flow(Fluent). Назовём проект Smesitel, File-Save-Smesitel-Ok.

2 шаг. Инициализируем геометрический модельер, в проекте A Fluid Flow(Fluent) ЛКМ наводим на 2 строку Geometry,ЛКМ выбираем в падающем списке New Geometry.



Рис.1

3 шаг. В интерфейсе Design Modeler определяем узлы модели. Построим трубу-цилиндр, по которой проходит жидкость. Последовательно ЛКМ по спискам проходим путь Create-Primitive-Cylinder.



Рис.2

Детализация цилиндра(Cylinder1) – в окне Details View(Details of Cylinder1) выбираем координаты начального конца(0,0,-3)и протяжённость(0,0,6) и радиус цилиндра 0,5м (единица системы измерений Meter). Вид материала(Operation-Frozen material) нажимаем кнопку генерировать Рис.3



Рис.3

4 шаг. В центр модели врезаем сферу радиуса R=0,4 м. Последовательно ЛКМ по спискам проходим путь Create-Primitive-Sphere. Детализация цилиндра(Sphere1) – в окне Details View(Details of Sphere1) выбираем координаты центра(0,00)и радиус сферы 0,4м. Вид материала(Operation-Slice material) нажимаем кнопку генерировать Рис.5



Рис.4

5 шаг. Создаём внутренний цилиндр. Последовательно ЛКМ по спискам проходим путь Create-Primitive-Cylinder. Детализация цилиндра(Cylinder2) – в окне Details View(Details of

Cylinder2) выбираем координаты начального конца(0,0,-3)и протяжённость(0,0,6) и радиус цилиндра 0,2м. Вид материала(Operation-Slice material) нажимаем кнопку генерировать



Рис.5

В итоге получаем 5 тел, как видно из дерева проекта(Tree Outline) Рис.5.

6 шаг (наименование тел). Каждое из 5 полученных тел в дереве проекта переименовываем. Внешний цилиндр bottom, врезанная в него сфера(rotate) с вынутым внутренним цилиндром и три цилиндрических с внутренними диаметрами цилиндров жидких тел (левый – left, средний – middle, правый - right). Для этого в дереве проекта Tree Outline(5 parts 5 bodies) наводим курсор на каждое из 5 Solid ЛКМ, затем ПКМ, в падающем списке выбираем Rename, в строке body- указываем имя в дереве проекта. В результате всё выглядит как на Рис.6.



Рис.6

7 шаг. Для экономии оперативной памяти и времени счёта используем только половину модели разделённой плоскостью симметрии. Для этого выбираем путь Tools-Symmetry(ЛКМ). В дереве проекта указываем плоскость симметрии YZPlane (Puc.6), затем в Details View применить Apply(после чего в Details View напротив Symmetry Plane1 - YZPlane), нажимаем кнопку Generate(Puc.7).



Рис.7

После этого в графическом окне Graphics появляется половина модели (Рис.7). Указателями можно переместить модель вверх-вниз, вправо-влево. Далее необходимо сохранить геометрию модели(File-Save Project).

8 шаг (наименование плоскостей и поверхностей). Необходимо также именовать несколько поверхностей, для чего в верхней части функциональной линейки выберем указатель плоскости . Курсором на Рис.8 укажем торцевую поверхность(зелёным цветом) с именем inlet(вход).Затем активировать Generate.



Рис.8

Аналогично выход - торцевая поверхность тела right назовём outlet Puc.10.Нажать Generate.



Рис.9

Укажем также все элементы плоскости симметрии одновременным нажатием 2 клавиш Ctrl и ЛКМ зелёным цветом, затем курсором в области рисунка ПКМ создадим падающий список, выберем Named Selection Puc.10, назовём объединение поверхностей словом symmetry. Результат всех наименований приведен в дереве проекта Puc.11



Рис.10

Переименование тел. Наводим ЛКМ в дереве проекта курсор на тело подлежащее переименованию, затем используем ПКМ, в падающем списке выбираем rename и изменяем название тела. В результате можно сохранить список имён как на рисунке 11.



Рис.11

Сохраняем геометрию проекта File-Save project.

2 Построение сетки модели

9 шаг. В основной оболочке Project Schematic проекта A Fluid Flow(Fluent)





указываем (ЛКМ) Mesh-Edit, открывается сеточный построитель ANSYS ICEM CFD. В дереве проекта Project-Model(B3)-Geometry. Выбираем первое твёрдое тело Bottom Puc.12. Запоминаем настройки Ok. В разделе Detail of Solid выбираем material –solid(Puc.13).



Рис.13

Выбираем второе тело rotate Рис.13. В разделе Detail of Solid выбираем material -solid. Выбираем третье тело right Рис.13. В разделе Detail of Solid выбираем material -liquid.

Выбираем четвёртое тело middle Рис.13. В разделе Detail of Solid выбираем material – liquid. Выбираем пятое тело left Рис.14. В разделе Detail of Solid выбираем material –liquid.



Рис.14

10 шаг. Построение сетки. В дереве проекта Tree outline указываем курсором mesh. В окне Details of mesh – Sizing указываем(Relevance Centre –medium, Smoothing- medium, min size -0,001m, max size -0,01m) Рис.15.



Рис.15

Запускаем генератор сетки, выбрав Mesh(ЛКМ), затем (ПКМ) в списке указываем строку Generate Mesh(Рис.16). Работа генератора сетки показана на Рис.17. Итоговая сетка показана на Рис.18. В конце построения сетки необходимо сохранить проект. File-Save project.







Рис.17



Рис.18

3 Численное решение задачи

11 шаг. В оболочке Workbench Project Schematic двойным кликом ЛКМ запускаем решатель Fluent(Puc.19) в режиме 3D double precision(двойная точность, которая означает, что итерация решения задачи сменяется следующей итерацией, когда относительная ошибка всех переменных в модели становится меньше 0,001). Необходимо установить параметр double precision и сохранить настройки ok.

Tourse Wondson			
w we want unt comment al al al france france interest frances	na) Constant		
Herbern Andreen Strap Ansenses Strap A	Transmission T	I Inthe feature I Inthe feature I Inthe Constant I Inthe Const	
This forward, This Resumes To Page 10 To	Description (12) (22) (23) Conjugations (Conjugations) (Theorem Lauretter	
Torrent Technic Special Despected Spream record Communication Technic State			Norman Destinant

Рис.19

При загрузке решателя(Meshing) необходимо проверить качество сетки, нажав клавишу check(Рис.20)в разделе General.

	Canad .	itme +
Anny Anno Anno Anno Anno Anno Anno Anno	md Demonstration De	4412.
		<pre>erilig deeme ray same is fore. Pendin trivers:</pre>

Рис.20

Разделим сетку на части, соответствующим разным узлам модели, для этого выбираем действия Display-Mesh-Colors(выбрать Color by ID)-Close-Display - Close(Puc.21,22).Результат показан на Puc.23. Для нестационарных, переменных во времени явлений необходимо установить настройку transient(Puc.23).







Рис.22



Рис.23

12 шаг. Переходим в раздел Models-(Viscous-Laminar)- k-epsilon(2equations)-Ok. Используем уравнение k-epsilon(2equations) для турбулентной модели жидкости устойчивой для численного решения лабораторных задач.



Рис.24

13 шаг. Переходим в раздел Solution Setup- Materials. В окне materials активировать create/edit. В разделе create/edit Materials выбрать указатель Fluent Database- Water liquid(H2O)(Fluent Fluid Materials). Затем выбрать Copy-Close-Close.В разделе Materials активировалась строка water – liquid, на которой нужно остановить выбор в разделе Materials.

As and a set of the se	ing .	Materials		LINA				
To the control of the service of the	iay Timug Narid Narid	tal struk	Constantine and					-
Tangana Tan	I perce interferon experie interferon experie interferones inter the features relation features relation inter- ted to the second interferone interferones interf	constant.	real Consections Consections Consections Consection Con	Total Jack	han hattlannet hattlannet hattlag Moneue ethiologi endere ethiologi ethiolog		sed transfer a) Star (See Transfer (See Transfer	
Tangan a Cardinati (Sala and Andreas) Tangan a Cardinati (Sala and Andreas)				Ciberi.	Seek Speed	100.1		2
Binki secti Parak I. Pasad Icolome, (see)			1	Temperat	12 (See (1994) (Set)	tingipet	_	
East.				nini noti Denisi Esse:	Parent Conference (Second	Constant I	-	2

Рис.25



Рис.26

Укажем также файл чтения по цепочке File-Read-Profile- Profile File-all File-FF.1set-Ok(Puc.27,28).





Рис.28

14 шаг. Переходим в секцию Cell Zone Condition. Устанавливаем свойства узлов модели. Первый узел Bottom(Puc.29). Материал - алюминий(Material Name- aluminum). Дополнительные параметры сетки отсутствуют. Запоминаем настройки – OK.

and a second	Col Zeer Condition	1 miles		10.0		_	81.
Sandar Ultar Sandar Handar Hanna Hannar Hannar Landar	1012	Ling Lang Linford Talapad Lang A ann Ankar Talapad Lang A ann Ankar Talapad Lang A ann Ankar A ann Ann Ankar A ann Ann Ann Ann Ann Ann Ann Ann Ann An	n Hosei (Sarra 1	• 1840	-		
Claratery, Marrison Sectional Contraction		ALLOW-ALL DOG			-	e-aliai	
Refere		****	- annat	+	*/6	Lintlet	
SARY CHINE		+34912	(growt)		10	(Internet)	
National Installation	1	10010	(and)		#()	inerest.	4
Reskis Brokon and Anamato Peri Graporis	International In						
	+	-			_	_	

Рис.29

Второй узел left(Puc.30). Материал - вода(Material Name-Water-liquid). Дополнительные параметры сетки отсутствуют. Запоминаем настройки – ОК.

and a second of	And the state of t	all realized particular						
100-10-10	10 なを全国ノ	我 [][+1]	14 (Mar + 2, 4)	周余日				
÷	Call Zone Conditions	E	1			_		
indicate	fant.	for the			_			645
eral ele anti- constante acestante acestante	orden 1977 1986	research Factor (France Research France Research France Research Reference Prove	anna ina ilian Initan ilian Initan ilian	n Aller Aller Aller		ani materi	-	
inancis maketin 20		-	101	-	Peters int	lease		
No-Pytela Ne-Califolia		11.09	-		10	instant -	- 7	
ines .		1995	-MARINE	-	179	LONGER		1 1
Canadage.		790/5	(strengt		7.4	inerest.		1
in Robin and American Parts Report	III							. <i>L</i> .27
	There are a second							141577-1. 14152-521
	-				10000			

Рис.30

Третий узел middle(Рис.31). Материал - вода(Material Name-Water-liquid).Необходимо задать движение сетки Mesh Motion-активируем галочкой. Устанавливаем направление оси вращения Rotation Axis Direction-(x-1,y-0,z-0) . Устанавливаем скорость вращения Rotational Velocity-Speed(rad/s)-31.4. Запоминаем настройки – OK.

AT MAL AT NORT	Ena	1
Call Zone Cavelbiom	for law	
100		
200m		
	manual tame (sam kink) / / // //	
0001	Trunk Petton, Colema 2018 Jan/18 Tarim	
_	Total Box	
Cier+	And we have that there i have been been set of a provided there have been been been been been been been be	1
	all and an and a second s	
e./	knews (see farmer 128	
	Therese To Colliner agences - a disc Nober Pu/Chill your wy	
2	Researchistory Relation for Design	
	Andrew Protection of Alternational Contract	
a contraction of the second se	the second of th	
144	100 - anter e 11 juntet e	
- Not	that// main al intil from a	
101		
manual. Operations	Burneral Search Paralities of Marcel	
Contraction Printer	Sectional a the intervent	
and the second s		
Vimped adams	Las Turbes have	2
	Links growth and a second seco	1
inter i		
		-
	LON (GANA) AND	

Рис.31

Четвёртый узел right(Рис.32). Материал - вода(Material Name-Water-liquid). Дополнительные параметры сетки отсутствуют. Запоминаем настройки – ОК.

-	Gell Zone Conditions	
And a strange and the second s		media More all term (media later) More all term (medi
	and a second	
		David Stand Card

Рис.32

Пятый узел rotate(Рис.33). Материал - вода(Material Name-aluminum). Необходимо задать движение сетки Mesh Motion-активируем галочкой. Устанавливаем направление оси вращения Rotation Axis Direction-(x-1,y-0,z-0) . Устанавливаем скорость вращения Rotational Velocity-Speed(rad/s)-31.4. Запоминаем настройки – ОК.

	Cell Zone Candillons	E tool Destance
na ina Cary Contines Interfaces	WT working	Manaka Sawa (annan a) (2004) Independent Participation Subscriptions (Sama Sawa (Sawa (
en on relien		Faces to Added (P) Faces to in this participant of the face faces (see) Added to the face) Added to the face (see)
n Johnson	- tee	1 4 4 ()
nde 2 konstand Anerokons 1665 Hegorit	III	All a second data a constant
	Tanta tan	(See To Finder Money)
		(sc.) (dee) (rec)

Рис.33

15 шаг. Переходим в секцию Solution Setup(Boundary Conditions). Пропускаем все контактные области. Выбираем вход(inlet), Туре(pressure-inlet)-решение определяется входным избыточным давлением, Edit. Устанавливаем избыточное давление на входе Gauge Total Pressure (Pascal)-200000(2 технические атмосферы). Далее указать спецификацию Specification – Intensity and Hydraulic Diameter, turbulent intensively – 5%, Hydraulic diameter -0.4m(Обратите внимание, что десятичный знак нужно вводить в виде точки!). Для трубы гидравлический диаметр совпадает с её внутренним геометрическим диаметром. Запоминаем настройки– Ok(Puc.34).





Пропускаем поверхности interior, Выбираем все с названиями symmetry. выход(outlet), Type(pressure-outlet)-решение определяется выходным избыточным давлением, Edit. Устанавливаем избыточное давление на выходе Gauge Total Pressure (Pascal)- 0. Далее указать спецификацию Specification – Intensity and Hydraulic Diameter, turbulent intensively – 5%, Hydraulic diameter -0,4m. Для трубы гидравлический диаметр совпадает с её внутренним геометрическим диаметром. Запоминаем настройки-Ok(Рис.35,36).

	Scenifery Conditions	Line.
an Benug and Mi Soate Door Cantilloon Door Cantilloon	200 Palano 4 Interne 4 Int	
yne flede ansele rydenin O an Friedelik an Earnwei Der Heiner Geladenin A Mass wie Averaussei Sel	The second secon	Anuara Calar Anuara Anuara Calar Anuara Anuara Calar Anuara Anuara Calar Anuara Anuara Anuara Anuara Calar Anuara Anuar

Рис.35



Рис.36

Переходим к поверхности Wall13 – Shadow(Рис.37), так как она относится к правой части модели и внутренней трубе, выставляем размер шероховатости 0,001 м.-Ок.

11.	autor a	Breakey Condition		1: MAR			
ie ,	Annual and a second sec	State And And And And And And And And And And	Anne Anne		(Internet)) and (Internet)	a) (1000-)	Arts Arts Arts Arts Have part for the set of Have part for the set of the schedule part from schedule for fore schedule for the schedule for schedule for the s
			-		the Property		late. These try again.

Рис.37

Аналогично поступаем для поверхности Wall13(Puc.38)-Ok.

Name Description Description Description	The plant Salara Sa	the Addr failer light hand	Factor inter cate		
Hanny Provide y Cardinana Windowski Indowski Windowski Indowski <th>#</th> <th>Geogle 4 1 Geogle 4 1 Geogle 4 Geogle</th> <th>第十四十 第十十十 第十</th> <th>0.0.0</th> <th>Citables and</th>	#	Geogle 4 1 Geogle 4 1 Geogle 4 Geogle	第十四十 第十十十 第十	0.0.0	Citables and
Color Control	Marking Start Strong Sports Rodel, Ro	Decembery Conditions	-	-	ANSTR
Discrete from Objection (response) Discrete from (response) Discrete from (response) <	Cel Des Carthons	min Distantin	E Av		
Trans Dawn Trans Frank In procession and the large period during period and the ray again.	Address Advant Balaron Solaren Advant Umanne Markan Markan Newyaster Markan Newyaster Advant Newyaster Harda Parada Parada Markan New Advant Parada Parada Markan M	ner 30 ner 30	I red to depend to Ban- radie Teaming Teaming Statement and Reserved Re	cor) (mt) (nagrae (pr) (ordin 	A de la constante de la consta



Аналогично поступаем для поверхности Wall34-Shadow(Puc.39), которая относится к левой части модели и к трубе внутреннего радиуса с параметром шероховатости 0,001м-Ok. Wall34 относится также к левой части модели(Puc.40)-Ok.

Поверхность wall-37-shadow относится к средней части модели middle, которая вращается с частотой 5 оборотов в секунду(с угловой скоростью 10π paд/c)Рис.41. Поэтому устанавливаем параметры Mothing Wall – подвижная стенка, Rotational- вращение, параметры вращения , Rotation- Axis Origin(начало координат оси вращения –(0,0,0)),

Rotation- Axis Direction x=1,y=0,z=0. No slip- нет скольжения. Roughness Hight(m)-0.001m -величина шероховатости-Ok.

Indexemitivy Andraws	E++		-
And a second sec	For a family Manual (of trans.) VI VI	n) 100 (100100) 100 (10	1
	Responsible to the		
1996.1	Anterest local	or set	-
	Tred 4	1000 (1000)	-







	and the second se	E 44				
Any in the immunity basis basis that the immunity that the immunity of the the the the the the the the the the	Transformer Care allows	Der feins elsen - jel ten Jahren - Leit nur Jahren - Leit nur - Mannen - Leit nur - Mannen - Mannen -	Listani (Secol) (IIII (Potes Asso Secolaria Secolaria Secolaria Secolaria Secolaria Secolaria Secolaria	a) and advert	$\begin{array}{c} \begin{array}{c} \mbox{subtraction}\\ \mbox{$3-1$}\\ \mbox{formula}\\ $	1717
		1. Janishina + Compare	an lambat	a Long (net)		





Рис.42



Рис.43

Поверхность Wall-39 (Рис.42)также относится к классу подвижных и вращающихся стенок и к средней части модели, в то время как поверхность Wall-41 имеет неподвижные стенки и оносится к средней части модели(Рис.43).



Рис.44

Рис.45

На Рис.44 показаны настройки для неподвижной поверхности Wall-43, в то время как поверхность Wall-44-shadow является подвижной, вращающейся с направлением вращения(1,0,0) и относится к средней части модели с размером шероховатости 0,001м(Рис.45).

				Cities statute In	and the set	(b) its server are reasoned intellight		
				@		·····································		
1		-	-	tearing manipuscies adaption tables Science	Banadar Ditt 1967 1967	E-	la nee	-
E Fasta Thurs	Julia Colline Juli Marcello Yanadi Salahira Yanahi Marcello Yanadi Salahira Yanahi Marcello Yana Marcello Yana Marcello Yanahi Marcello) ten (Hansen) stri (H	-	Tokk Naison Affen Cobins Affen Schlaum Schlaum Schlaum Schlaum Naison Na	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	Alberti Cel San 101 Transf II: Transa Dakkini Ji Pol Mit Transa Dakkini Ji Pol Mit Transa Daka Pol Mit Transa		and I wanted
18. January 1. January Health	Regions for the first free for t	inerest.	19.19	Traction Angles and Argoneous Ages Angeons	- 18 Saucesta	pathagines built and all of any built on built (a)	Sector Sector	1.00
and the	[el las			Hotela	(a)	See 1	



Рис.47

Неподвижны также поверхности Wall-46(left)Рис.46 и Wall-47(right)Рис.47. После каждой настройки поверхности необходимо их запомнить нажатием Ok.

Последней подвижной поверхностью в списке является Wall-49(middle)Рис.48. Устанавливаем также параметры moving wall, Rotation- Axis Origin-(1,0,0), Rotation- Axis Direction x=1,y=0,z=0, Roughness Hight(m)-0.001m.-Ok.

		all over		and the second second		
N Conservation of the second s	Terrent Via Terrent	inter des inder Appendichten web-	Relation (more) , we i had teatro I menero A About A da America Presente Conservation Conserv	anno (an Franss) *** *** *** *** *** *** ***	more (red); (β - 4) Constraints (β - 4) (β - 4)	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
			trrar: de e trrar: de e	ing) (and) (and) more experiment the lag	enerber. Flavor try ay	p19.

Рис.48

16 шаг. Переходим к разделу Solution Setup(Dynamic Mesh). Галочками активируем свойства Dynamic Mesh, Smoothing, Layering, Remising (Рис.49). Рекомендуемые параметры Smoothing также указаны на Рис.49.



Рис.49

Рис.50

Параметры Layering(слоистости) (Рис.50) – именно такие параметры рекомендуют специалисты Самарского аэрокосмического университета (Бирюк В.В. Расчёт тепловых процессов в камере сгорания ДВС с помощью программы FLUENT) указаны на рисунках 50,51 соответственно. Remeshing(перемешивание учитывается через 5 интервалов временной итерации). Устанавливаем параметр Region Face. Кроме того, необходимо

знать минимальный и максимальный размеры ячеек, определить которые можно клавишей Mesh Scale Info, установить автоматически нажатием Use Defaults(Puc.51).



Рис.51

После установки Smoothing, Layering, Remeshing запоминаем настройки-Ok.

17 шаг. Переходим к разделу Dynamic Mesh- Dynamic Mesh Zones – Create/Adit.



Рис.52

Bottom – основная (деформируемая) внешняя часть модели, поэтому в разделе Dynamic Mesh Zones устанавливаем Deforming- Create, после этого в основной части интерфейса Dynamic Mesh Zones появляется запись Bottom- Deforming(Puc.52). Некоторые части сетки почти не деформируются, но параметры деформации можно определить с помощью Zone Scale Info – в отельном интерфейсе Zone Scale Info необходимо скопировать параметры Minimum Length Scale, Maximum Length Scale и перенести параметры в Dynamic Mesh

Zones(Puc.52). Create. Close. В падающем списке выбираем следующую часть динамической сетки contact_region_ contact_region3-Create-C и записываем в настройки параметры деформации (Puc.53,54).





Рис.54

В некоторых элементах деформируемой сетки изменяются все три параметра деформации, в том числе Maximum Skewness, как например, на Рис.55.

and a second	Dynamic Marin	LTRA			
latis Deca Soveral Reddi Reconst	Provent State Real-States (Index 2 Annual State 2 A	e-coule to M			ah <u>M</u>
Del Date Candidano Insertino Conditione Regis Interclasion	(anna)	Are have a state of the second second second second	Technic Head Sarms	it.ooo.tamit.oo	1.1
Auf Jean of Yolani Information Subara Martine Perform Solaria Senapatan Caladata Alaman	Denta of Dynamic Node Dates Telefore - Determining on and program control of control regime control of control regime control of	Tot Malaner Bagtinov Balaner Demosional Comer Captra	and and inside the second s	n Janet an S	
ndi Daditi iyil Awaktiri. 1935	-	Herri Artura Generic Centres - Mil	* Tahar gasan	President President	T make
HooHI	Smalls - China	Refront	A Sora Campo	Rowald angle Science (an	alatanta a
	States Constitution	There is a second secon	Providing Storman	I Have be devened	nasa
	×	Reduce anything of 1000		(She) 198	

Рис.55

При определении элементов сетки интерьера(interior) получим сообщение о невозможности деформации данного элемента (Рис.56). Поэтому определяем элемент как недеформируемый (Рис.57).



Рис.56



symmer Norhulden becom-Devin mig- contract, jegkon contract, jegkon (S-contract, jegkon contract, jegkon contract, jegkon (S-contract, jegkon contract, jegkon contract, jegkon (S-contract, jegkon contract, jegkon-contract, jegkon (S-contract, jegkon contract, jegkon-contract, jegkon (S-contract, jegkon contract, jegkon-contract, jegkon (S-contract, jegkon contract, jegkon-contract, jegkon (S-contract, jegkon contract, jegkon (S-tract) (D-contract, promoter, jegkon (S-tract) (D-contract, contract, jegkon (S-tract)) promoter, jegkon (S-tract) promoter, jegkon (S-tract) pr	Dynamic Mech Zones consist, region, Jeric - Detorming nonset, region, Jeric - Detorming notice: region, Jeric - Detorming india - Sinformity india - Michaematic india - Sinformity india - Michaematic india - Sinformity india - Sinformity india - Detorming india - Detorming - Detormi	Departs, Most Lares The Ko-model - Defaining The Ko-model - Defaining The Ko-notate-Defaining Mit Colon in model - Defaining odde - Defaining total - Defaining total - Defaining sometry - Bit Defaining sometry - Bit Defaining sometry - Bit Defaining sometry - Bit - Defaining	() () ()
Detropic Mech Zonos symmetry-robbe chain onin symmetry-robbe Stationing symmetry-robbe Externing weight Statumer weight Statumer stat	nem, Mesh Zones al 35 Sist on ay al 37 Sist on ay al 37 Sist on ay al 37 Sist on ay al 39 Sist on ay al 39 Sist on ay al 40 Sist on ay	Synamic Hesh Somes Ind-42 - Stationery Ind-42 - Stationery Ind-43 - Stationery Ind-43 - Stationery Ind-43 - Stationery Ind-45 - S	ann M

Рис.58

На Рис.58 указаны все элементы списка деформируемой либо стационарной сетки. Переходим в раздел Dynamic Mesh- Preview Mesh Motion(Рис.59) и устанавливаем параметры предварительного движения сетки, записи решения и анимации решения.

The state of the local division of the local	And the second sec	
# 際谷田市大田市(福+日	1. 1971年21日日日日日	
Bywards Miles Y Innets Ball Mal Miles (1995)		16011
Lange Janes		- <u>1</u> -
-	Boom 1 i dia terreget Sing Same reget Sing Same reget Sing 1	
	An	

Рис.59

Current Mesh Time(s)-0, Time Step Size(s)-0.02 (временной интервал), Number of Time Steps (число интервалов записи)-150. Apply-Close(Рис.59).

18 шаг. В разделе Solution Setup – Solution – Solution Initialization устанавливаем параметры турбулентной кинетической энергии и турбулентной скорости диссипации 1%(Рис.60)

E	C Desar & m-	D. M. C. B. B. B.
Heating West of the second lister to be the second the second	Section Information Informatio Information Information Information Information Information	
	Advancements may a factor (27) Advancement may be a factor and a facto	Frem: in ervor scoures inclug annthin. Finne bry spile. Free Hjelt: () taterspileg interspileg interspileg interspileg i

Рис.60

Запускаем начальный этап решения задачи –Initialize(Рис.60).

19 шаг. Настраиваем параметры записи и анимации, переходим в раздел Calculation Activities- Solution Activities – Solution Animation-Create/Edit. Указываем число анимации(Animation Sequences -7). Iteration - Time Step - Define. Window-2-Set(очистить текущее указанное окно). Display Tape – Contours (поле физических величин)Рис.61.

Hadrey	Coloriadaes Activities	LTMA-	
Hard Capacities Second Hards Process Common Coll Second Canadians	Antonio Direc (Dec. (Max)) 1 Security (Sec.)	1461	ANDER
margini condinine Megi basetuate. Strates: Mark Milyaansh rekuti	044-51 In.		
Solate Particip	Creat Council	Colour Investor	
Newfory Soldier Statistics		Resulton Separations 7 (A) (B)	
BQ-Calulation:		Arris Ben Day offer	
Renda	(Demotelling)	and one 1 1 and inclusion of Contents	-1
Teles	date in a life transment of the life Car	magered (2 data data data data data data data da	
Ropolii	Classes (Science, Science)	annen (* bears + blan.)	Thereits (1) Lig and, 54 Barada
		and and a local an	
	1	instant i thinks	
	Same	(a) (a) (a)	And second
		former bejest: () Teterrepting Base.	arflease try again.
	Stream and the	Participant line	

Рис.61

Выбираем поверхности построения поля interior-left, interior-right, interior-middle, interior-rotate, symmetry-bottom, symmetry-right, symmetry-left, symmetry-middle, symmetry-rotate(Puc.62).



Рис.62

Display – Close. Ok. Поле с рисунком нужно развернуть в нужной плоскости стрелкой поворота, в результате получим Рис. 63. Значком+ на функциональной линейке можно выделить нужную часть рисунка и увеличить её в масштабе.

Calific diversity from the data series (III A plan research in mont) (PERCE)	C Aliza d'ana d'handina anna (B. A. An Anna anna anna anna anna anna an
第二日を見て知道「間を見た」を、「ほりひ」「第1日の日の日日日日	第二日を設める市 間を出たす 出し ほうひゃ 田田田田田
And	And A Contract of
Bit American Support American Support Description Band Tamerican	■ Annotation Note that
Life. Land. Conc	(and (and (and))
Uniter Uniter< <	Normalization Normalinstation Normalization Normal



Рис.64

Аналогично можно построить поле давления(Pressure – Puc.64). Display – Close. Ok. А также поля модуля скорости (полной скорости)Velocity Magnitude(Puc.65). Display – Close. Ok. Поле скорости по координатным осям(х-Рис.66,у-Рис.67,z-Рис.68). Поле коэффициента турбулентной вязкости Рис.69.

A first of second frame discussions with the spectrum data	- Interfection -	Start dans dans de 191 % per en en en	and interested in
·····································	- MORE REAL	※ (1・1・1)なみも国大(株)(株・ロ・	CONTRACTOR OF MANY
Annual Carbon Maryon Annual Carbon Statements Statement		Televisione Solicitore Televisione Solicitore Solici	
	с. 100 г.	and Days Carebook Mary Kanadaka Mary Kanadak	
JPL MMT MM 2 Max Max Max 3 Max Max Max Max 4 Max Max Max Max Max 4 Max Max Max Max Max Max 5 Max 1 Max	Listent Biogrammente (Direct/Direct) Alle d'Anne d		

Рис.65

Рис.66



Рис.67

Рис.68



Рис.69

В результате активируются все 7 анимации Рис.70.

20 шаг. Переходим к запуску решателя. Для записи анимации проходим путь File-Rite-AutoSaved(Рис.71).







21 шаг. Переходим в раздел Run Calculate. Устанавливаем параметры число шагов 150, интервал записи 0.02с, максимальное число итераций 50(Рис.72). Запускаем решатель-Calculate.

E	■ 間空後後月 代、間・日・	第三人名意大利意思	
_	The Calcolation	income -	
Man Seyamon Salkan Sea Salkan Hendi Maning Cel Con Societos Man Sentan Man Se	Program Loss (Annuelles) Program Los	Course process	
PED Incont	1 g	MANTER MANTER	AND AD AN AND ADDRESS OF ADDRESS (ADDRESS)
	(JANNA GANAN) Contae	68 2.0276-07 2.0015-05 6.0156 10.2.0016-07 2.0055-05 6.0156 10.2.0016-05 1.0016-05 6.0156 10.2.0016-05 1.0016-05 6.0166 10.40025-05 1.01576-05 6.0167 10.0016-05 1.0155-05 1.0176 10.0016-05 1.0156-05 1.0176 10.0016-05 1.0156-05 1.0176 10.0016-05 1.0156-05 1.0176 10.0016-05 1.0156-05 1.0176 10.0016-05 1.0156-05 1.0166 10.0016-05 1.0156-05 1.0166 10.0016-05 1.0156-05 1.0166 10.0016-05 1.0156-05 1.0166 10.0016-05 1.0156-05 1.0166 10.0016-05 1.0166-05 1.0166 10.0016-05 1.0166-05 1.0166 10.0016-05 1.0166-05 1.0166 10.0016-05 1.0166-05 1.0166 10.0016-05 1.0166 10.	00 0,11414-00 0,1004-00 1 00 0,2014-00 0,1468-00 4 00 0,2014-00 0,1468-00 4 00 0,2014-00 0,1468-00 4 00 0,2014-00 0,2014-00 4 00 0,2014-00 1,4204-00 3 00 0,2014-00 1,4204-00 3 00 0,2014-00 1,4204-00 4 00 0,2014-00 1,4204-00 4 00 0,2014-00 1,4204-00 2 00 0,2014-00 1,4204-00 2 00 0,2014-00 1,4204-00 2 00 0,2014-00 1,4204-00 2 00 0,2014-00 1,4204-00 2 00 0,2014-00 1,4204-00 2

Рис.73

Вычисление невязки по всем переменным в системе уравнений гидродинамики (уравнение неразрывности, x, y, z компоненты скорости, невязки переменных k, epsilon в модели k-e(2eon)) можно просматривать в любой момент времени (Puc.73). 22 шаг. Активация анимации. Переходим в секцию Results-Graphics and Animation(Puc.74). В разделе выбираем путь Animations-Solution-Animation Play Back. Во вкладке Animation Frames выбираем тип графического файла MPEG. Запускаем запись Rite(Puc.75). Записанный покадрово фильм для поля турбулентной вязкости содержится(sequence7) в папке FF1-Fluent- sequence7-mpeg.





```
Рис.75
```

Аналогично можно получить файлы временных изменений физических полей, например динамику поля давления(sequence2)Рис.76 или динамику поля модуля полной скорости (sequence3)Рис.77, которые находятся по цепи вложений FF1-Fluent- sequence2mpeg

(FF1-Fluent- sequence3-mpeg).

Lo mar Ama 1	man Adapt Arbeit Stepher Assort Sarper-	Was me		State Intel Mark State of		
8 (1 ar)	·· 関連出法大部一項一個+11+	「「「「」」「「」」」「「」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」」	W 24	山 開發因得考 有	(#+I)+ (#+++)	CONTRACTOR OF
-	Capture and Incoments	2. Consult of Rate Densel - #		Classifies and farmations	in the second se	and the second se
	interna Interna Interna Interna					Auto
Internet			internet int			
	-	4	4	August	11	4
1		A second				An example of the second secon
Filed		and the second		and the second	-	

А.А. Соловьёв, О.А. Сперанская, Д.Ф. Пастухов, Ю.Ф. Пастухов ВРЕМЕННАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СОСТОЯНИЙ СИСТЕМЫ В ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ

Научные руководители: Д.Ф. Пастухов, О.А. Сперанская

Полоцкий государственный университет, г. Полоцк, Республика Беларусь

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Российская Федерация

Anton_solovuoy@gmail.com,dmitrij.pastuhov@mail.ru,pulsar1900@mail.ru

В формировании гидродинамических явлений большой интерес представляет начальный промежуток времени ИХ линамики. Ha важность инициализации нестационарной задачи указывала A.A. Сперанская, профессор Московского государственного университета [1, 2]. В гидродинамических задачах с вязкостью нет простых законов сохранения таких как, например, закон сохранения механической энергии. А в задачах с нелинейными уравнениями и диссипацией возможно явление самоорганизации систем [4]. Согласно И. Пригожину, динамику развития необратимых термодинамических систем определяет принцип минимизации скорости роста энтропии [4]. Проверим применимость принципа Пригожина к гидродинамической задаче, для чего предварительно численно решим её в оболочке ANSYS Fluent.

Рассмотрим гидродинамическую систему из последовательных периодически соединённых цилиндров большего диаметра 20 см и меньшего 10 см равной длины 50 см. В симметричной геометрической модели использовалось 7 цилиндров: 4 малого и 3 большего диаметров. Скорость воды на входной трубе равнялась 30 см/с. На этапе создания геометрии линии соединения между цилиндрами скруглялись параметром blend с фиксированным радиусом 0,5 мм. Для ускорения времени счёта в 2 раза решателем использовалась осевая симметрия модели. Параметры сетки выбирались по умолчанию со средним разрешением. В решателе нами использовалась стандартная модель

k-epsilon(2eqn) жидкости из двух уравнений (устойчивая в лабораторных задачах) с учётом уравнения обмена энергией. Выбран также нестационарный режим модели transient с временным шагом $\tau = 3 \cdot 10^{-2}$ с для сохранения поля скорости и поля температуры. Для анализа гидродинамической задачи с вязкостью можно пренебречь нагреванием жидкости, но важно учесть поле распределения скорости и турбулентной вязкости. Интенсивность турбулентности на входе и на выходе модели равна нулю. Благодаря этому можно было выяснить механизм зарождения турбулентности во времени, обусловленный влиянием геометрии модели. Результаты численного решения задачи представлены на рисунках 1, 2, 3, 4 – суть поле скорости и поле турбулентной вязкости в моменты времени $t = 3 \cdot 10^{-2}$;1,56 с.

На этапе решения использовалась двойная точность решения, когда решатель переходит к следующей временной итерации, если относительная погрешность по всем 8 переменным, входящим в систему гидродинамических уравнений, будет ниже 10^{-3} . Поле турбулентной вязкости совпадало с полем эффективной вязкости, т.е. молекулярной вязкостью в задаче можно было пренебречь.



Рис.1. Поле скорости в момент времени $t = 3 \cdot 10^{-2}$ с.



Рис.2. Поле скорости в момент времени t = 1,56 с.



Рис. 3. Поле турбулентной вязкости в момент времени $t = 3 \cdot 10^{-2}$ с.



Рис. 4. Поле турбулентной вязкости в момент времени t = 1,56 с.

Используем функционал скорости роста энтропии в гидродинамической задаче по Л.Д. Ландау [3]:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int\rho s dV = \int \frac{k(\nabla T)^2}{T} dV + \int \frac{\eta}{2T} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{i,k}\frac{\partial v_l}{\partial x_l}\right)^2 dV + \int \frac{\zeta}{T} \left(\left(di\vec{v}\vec{v}\right)^2\right) dV = 0$$

$$=\int \frac{\eta}{2T} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{i,k} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right)^2 dV = \int \frac{\eta}{2T} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right)^2$$
(1)

Известно, что для несжимаемой жидкости $divv = \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3}$ и температурное поле в задаче можно считать однородным $\nabla T = 0$. Запишем компоненты тензора

напряжения в цилиндрической системе координат с учетом осевой симметрии [2] $v_{a} = 0, \partial(\cdot) / \partial \varphi = 0$:

$$\sigma_{rr} = -p + 2\eta \frac{\partial v_r}{\partial r}, \sigma_{\varphi\varphi} = -p + 2\eta \frac{v_r}{r}, \sigma_{r\varphi} = 0, \sigma_{z\varphi} = 0, \sigma_{zz} = -p + 2\eta \frac{\partial v_z}{\partial z}$$
$$\sigma_{zr} = \eta \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right), \sigma_{ik} = \eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i}\right) \Leftrightarrow \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} = \frac{\sigma_{ik}}{\eta}.$$

Используем нулевое избыточное давление в модели p = 0, $\eta = \eta(r, z)$, $\bar{v} = \bar{v}(r, z)$:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int\rho s dV = \int \frac{\eta}{2T} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i}\right)^2 dV = \int \frac{\eta}{2T} \left(4\left(\frac{\partial v_r}{\partial r}\right)^2 + 4\left(\frac{v_r}{r}\right)^2 + 4\left(\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right)^2\right) dV = \\ = \int \frac{2\eta}{T} \left(\left(\frac{\partial v_r}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{v_r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right)^2\right) dV \approx \\ \approx 2\frac{\eta}{\overline{T}} \left(\Delta v_r^2 \left(\frac{2}{R^2} + \frac{1}{4l^2}\right) + \Delta v_z^2 \left(\frac{1}{4R^2} + \frac{1}{l^2}\right) + \frac{1}{2} \frac{\Delta v_r \Delta v_z}{Rl}\right) V, V = 2l\pi R^2$$

$$(2)$$

где: $\Delta v_r = v_r(R) - v_r(0)$ — разность скорости частиц жидкости в радиальном направлении на стенке и на оси цилиндра, $\Delta v_z = v_z(l) - v_z(0)$ — разность скорости частиц жидкости на оси в центре цилиндра и на правом крае, R = 10;5 см радиусы большего и меньшего цилиндров, l = 25 см — половина высоты цилиндра, $V = 2l\pi R^2$ — объём цилиндра. $\overline{\eta}, \overline{T}$ — среднее значение турбулентной вязкости и абсолютной температуры по области. Учитывая периодичность модели, рассчитаем скорость роста энтропии, используя формулу (2) для одного узкого и одного широкого цилиндров, образующих периодический элемент модели.

В момент времени $t = 3 \cdot 10^{-2}$ с, запишем данные рисунков 1, 3

$$(\Delta v_r)_1 = -7.5 \cdot 10^{-2} \, \text{m/c}, R_1 = 0.1 \text{m}, l = 0.25 \text{m}, (\Delta v_l)_1 = -2 \cdot 10^{-2} \, \text{m/c}, \overline{\eta_1} = 1.18 \cdot 10^{-3} \, \text{ke/m} \cdot c$$
$$(\Delta v_r)_2 = -0.3 \text{m/c}, R_2 = 0.05 \text{m}, l = 0.25 \text{m}, (\Delta v_l)_2 = 0 \text{m/c}, \overline{\eta_2} = 1.18 \cdot 10^{-3} \, \text{ke/m} \cdot c, \overline{T} = 300 \text{K},$$

ось z на рисунках направлена справа налево.

Нижние индексы: 1 – соответствуют цилиндру радиуса $R_1 = 0, 1M$, 2 –соответствует цилиндру радиуса $R_2 = 0,05M$. По формуле(2) получим:

$$\begin{split} \dot{S} &= 2\frac{\overline{\eta_{l}}}{\overline{T}_{1}} \bigg((\Delta v_{r})_{l}^{2} \bigg(\frac{2}{R_{l}^{2}} + \frac{1}{4l^{2}} \bigg) + (\Delta v_{z})_{l}^{2} \bigg(\frac{1}{4R_{l}^{2}} + \frac{1}{l^{2}} \bigg) + \frac{1}{2} \frac{(\Delta v_{r})_{l} (\Delta v_{z})_{l}}{R_{l}l} \bigg) 2l\pi R_{l}^{2} + \\ &+ 2\frac{\overline{\eta_{2}}}{\overline{T}_{2}} \bigg((\Delta v_{r})_{2}^{2} \bigg(\frac{2}{R_{2}^{2}} + \frac{1}{4l^{2}} \bigg) + (\Delta v_{z})_{2}^{2} \bigg(\frac{1}{4R_{2}^{2}} + \frac{1}{l^{2}} \bigg) + \frac{1}{2} \frac{(\Delta v_{r})_{2} (\Delta v_{z})_{2}}{R_{2}l} \bigg) 2l\pi R_{2}^{2} = \\ &= 2\frac{1.18 \cdot 10^{-3}}{300} \bigg((-7.5 \cdot 10^{-2})^{2} \bigg(\frac{2}{0.1^{2}} + \frac{1}{4 \cdot 0.25^{2}} \bigg) + (-2 \cdot 10^{-2})^{2} \bigg(\frac{1}{4 \cdot 0.1^{2}} + \frac{1}{0.25^{2}} \bigg) + \\ &+ \frac{1}{2} \frac{(-7.5 \cdot 10^{-2})(-2 \cdot 10^{-2})}{0.1 \cdot 0.25} \bigg) 2 \cdot 0.25\pi (0.1)^{2} + 2\frac{1.18 \cdot 10^{-3}}{300} (-0.3)^{2} \bigg(\frac{2}{0.05^{2}} + \frac{1}{4 \cdot 0.25^{2}} \bigg) 2 \cdot 0.25\pi (0.05)^{2} = 2.35 \cdot 10^{-4} \\ \mathcal{I} \mathrm{X}/(\mathrm{c \ K}). \end{split}$$

Аналогично для момента времени t = 1,56 с запишем данные рисунков 2, 4:

$$(\Delta v_r)_1 = -7,5 \cdot 10^{-2} \, \text{m/c}, R_1 = 0,1 \text{m}, l = 0,25 \text{m}, (\Delta v_l)_1 = -0,15 \text{m/c}, \overline{\eta_1} = 4 \cdot 10^{-4} \, \text{ke/m} \cdot c$$
$$(\Delta v_r)_2 = -0,2 \text{m/c}, R_2 = 0,05 \text{m}, l = 0,25 \text{m}, (\Delta v_l)_2 = 0 \text{m/c}, \overline{\eta_2} = 2 \cdot 10^{-4} \, \text{ke/m} \cdot c, \overline{T} = 300 \text{K}.$$

По формуле (2) в момент времени t = 1,56 с получим: $\dot{S} \approx 2,6 \cdot 10^{-7}$ Дж/(с К).

Сравнение рисунков 2 и 4 показывает, что у правого края каждого цилиндра большего радиуса образуется сферическая область с диаметром равному диаметру меньшего цилиндра с большим значением турбулентной вязкости и большим значением градиента скорости. Эта сферическая область максимально локализована, неоднородна и является переходной между цилиндрами различного радиуса. Рассчитаем в ней скорость роста энтропии:

$$\dot{S} \approx 2 \frac{\overline{\eta_1}}{\overline{T_1}} \left(\frac{(\Delta v_r)^2}{R_2^2} \right) \frac{4}{3} \pi R_2^3 = \frac{8}{3} \pi (\Delta v_r)^2 R_2 \frac{\overline{\eta_1}}{\overline{T_1}} = \frac{8}{3} \pi \cdot 0.15^2 \cdot 0.05 \cdot \frac{1.4 \cdot 10^{-3}}{300} \approx 4.4 \cdot 10^{-8} \text{ Дж/(c K)}.$$

Сравнивая три полученных результата скорости роста энтропии в гидродинамической задаче, отметим, что максимальная скорость роста энтропии в системе возникает в начальный промежуток времени $t = 3 \cdot 10^{-2}$ с. В течение этого интервала жидкость в каждом цилиндре ведёт себя как единое целое. Это подтверждает

однородное поле вязкости с высоким значением $\eta = 1,1 \cdot 10^{-3}$ кг/(м с) по всему объёму системы и однородным полем скорости в каждом цилиндре (с разными значениями скорости в цилиндрах большего и меньшего диаметров). Полученное численное решение показывает, как система реагирует на движение жидкости – сначала происходит разделение жидкости на слои вдоль движения потока, поскольку центральный однородный осевой слой имеет большее значение турбулентной вязкости, чем слой жидкости, примыкающий к стенкам. Т.е. центральный слой ведёт себя как более «жёсткая», вязкая среда, чем жидкость у стенки цилиндра.

Спустя 1,56 с, как видно из рисунков 2 ,4, происходит разделение поля вязкости в объёмах малого и большого цилиндров в направлении поперёк потоку. Действительно, нужно больше времени, чтобы вихревые образования посредством диффузии прошли расстояние сравнимое с высотой цилиндра. Диффузия вихрей в поперечном направлении происходит раньше, так как отношение радиуса к высоте цилиндра равно 1:5 (1:10). Тогда к моменту времени 1,56 с скорость роста энтропии в гидродинамической системе уменьшается в $\frac{2,35 \cdot 10^{-6}}{2,6 \cdot 10^{-7}} \approx 8,9$ раз. Сферическая область, в которой наибольшие значения коэффициента турбулентной вязкости и градиента скорости, от которых зависит скорость роста энтропии, имеет малый объём, что также снижает интеграл согласно формуле (2). В такой локализованной области значение скорости роста энтропии спустя 1,56 с меньше чем полное начальное значение во всей системы в $\frac{2,35 \cdot 10^{-6}}{4,4 \cdot 10^{-8}} \approx 53,4$ раза.

Таким образом, решённая нами численно задача показывает, что временная последовательность состояний в гидродинамической системе заключается в последовательном приведении в действие механизмов, уменьшающих скорость роста энтропии со временем. То есть и к гидродинамическим системам применим принцип И. Пригожина.

Список использованных источников

1.Общая геофизика: Учебное пособие / Под ред.В.А. Магницкого. – М.: Изд-во МГУ, 1995. – 317с.: ил.

2. Анисимова Е.П., Пастухов Д.Ф., Сперанская А.А., Сперанская О.А. О роли аэрации в формировании термического режима геотермального озера. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана.1996. Т.32.№2. С 267–273.

Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Для вузов. В 10т.
 Т.6. Гидродинамика. – 5-ое изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 736 с.

4. Г. Николис, И. Пригожин. Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипации структур и упорядоченность через флуктуации. – М.: Мир. 1979. 512 с.

5. Материалы 4 научно-практической конференции (часть 1). Прикладная математика и информатика: Современные исследования в области естественных и технических наук А.А.Соловьёв, О.А.Сперанская, Д.Ф.Пастухов, Ю.Ф.Пастухов Временная последовательность состояний системы в гидродинамических задачах. Тольятти,2018,стр. 496-502.

УДК 519.6 МОДЕЛИРОВАНИЕ БЫСТРОПЕРИОДИЧЕСКОГО ПРЕРЫВАНИЯ ПОТОКА ЖИДКОСТИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ В ОБОЛОЧКЕ ANSYS FLUENT

Сперанская О.А. Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Волосова Н.К. Московский государственный технический университет им Н.Э.Баумана(г.Москва),Российская Федерация

Пастухов Д.Ф., Пастухов Ю.Ф., Соловьёв А.А., Голубева О.В., Ехилевский С.Г., Радкевич Д.С. Полоцкий государственный университет, Республика Беларусь

Математическое моделирование включает анализ математических уравнений [1-4]. Результатом моделирования является удобная геометрическая конструкция, формула, простой алгоритм, идеальный по сравнению с исходным явлением, но сильно упрощающий исходную постановку математической задачи. Модель явления, например, можно получить анализом экспериментальных данных (классификацией 60 профилей температуры при построении формулы термодинамического потенциала геотермального озера)[3]. Применяя метод теории размерностей[4], можно свести любую задачу экономии строительных материалов с максимальным радиационным ослаблением к задаче линейного программирования для комбинированной стенки толщиной 1м. Затем используя графики полученного численного решения ЗЛП библиотекой IMSL FORTRAN, масштабированием (растяжением) графиков для толщины 1м просто получить графики решения для произвольной толщины стенки[4]. Можно заменить натурный эксперимент численным экспериментом в оболочке ANSYS, как и сделано нами в данной работе, что существенно экономит время и финансовые затраты.

На рисунках 1,2 нами построена геометрия и сетка гидродинамической задачи в ANSYS Fluent для моделирования быстропериодического прерывания движения жидкости

по трубе длиной 6м круглого сечения и диаметром 40см. В одной части трубы(рис.1) вода находится под избыточным давлением 2атм(200000 Па) и при открытом шаровом прерывателе (с диаметром сферы 80см) давление беспрепятственно передаётся в другую часть трубы, порождая общее движение воды вдоль оси z. В прерывателе имеется полый цилиндр равного диаметра 40 см и соосный с основной трубой. При изменении ориентации шарового прерывателя на 90⁰ направленное движение воды вдоль оси z прекращается и динамика воды в правой части трубы определяется её начальным состоянием в момент прерывания и контактным увлечением вращающимся шаровым прерывателем при отсутствии избыточного давления. При численном моделировании выбрана сетка, которая имеет среднее разрешение с максимальным размером ячейки 2см и минимальным размером ячейки 1мм.







Рис.2. Построение сетки модели

В решателе дополнительно использовались функции нестационарной модели, функции сетки с подвижными стенками и функции деформируемой во времени сетки. Для воды использовалась $k - \varepsilon(2 \text{ eqation})$ модель, которая устойчива в лабораторных гидродинамических задачах. Мы предположили, что стенки труб имели шероховатость высотой 1мм.





Рис.3. Поле плотности во 2 фазе

Рис.4. Поле плотности в 3 фазе

Поворот прерывателя с частотой вращения 5 об/с($10\pi pad/c$) записывался с интервалом времени 0,02с для 10 фаз угла поворота. При любой ориентации прерывателя области с жидкостью во всех частях трубы оставались связными, т.е. вода не дробилась на части, не распадалась на подобласти, несмотря на то, что существуют моменты времени, когда в правой части модели возникает отрицательное давление, как видно из рис.3,4,5,6.



Рис.5. Поле давления во 2 фазе

Рис.6. Поле давления в 1(6) фазах

Во второй фазе перепад давления на прерыватель составляет 6 атм(рис.5), а градиент давления и в правой и в левой части трубы имеет положительное направление на ось z. В 1(6) фазах градиент давления отрицательный со значением -0,7 атм/3м(рис.6). В начальный промежуток времени 0 -0,5 с вниз по потоку возникает тонкая структура на гребнях максимального значения профиля вертикальной компоненты скорости v_y (рис.7), вероятно, образуется стоячая волна давления, которая порождает мелкомасштабную турбулентность.





Рис.7. Поле скорости v_y в момент t = 0.04 с

Рис.8. Поле скорости v_y в момент t = 2,02 с

На рис.9,10 видно как зарождается вихрь на нижней стенке трубы справа от прерывателя на фоне общего потока. В момент времени t = 0,1 с вихрь значительно меньше диаметра трубы, но к моменту t = 3 с вихрь уже простирается вдоль оси z на несколько её диаметров.



Рис.9. Поле модуля скорости (t = 0,1c)

Рис.10. Поле модуля скорости (t = 3c)

На рис.11 прослеживается возвратное движение жидкости справа от прерывателя на верхней стенке трубы противоположно оси z (на нижней стенке оно вдоль оси z), что также указывает на присутствие крупного вихря с вращением встречным к вращению прерывателя. На поле турбулентной вязкости развитого турбулентного движения на рис.12 заметен гигантский вихрь (по семейству концентрических овалов равной вязкости). Число Рейнольдса в модели равно 4000000. Но теоретическое критическое число Рейнольдса для трубы равно 2300. Как показал Л.Д. Ландау[2], при больших R движение завихрённой жидкости можно описать как потенциальное движение (вдали от стенки).





Contours of Z Velocity (m/s) (Time=3.0000e+00) May 12, 2018 ANSYS Fluent 15.0 (3d, dp. pbns, dynamesh, ske, transient)

Contours of Turbulent Viscosity (kg/m-s) (Time=3.0000e+00); May 12, 2018 ANSYS Fluent 15.0 (3d. dp. pbns, dynamesh, ske, transient)

Рис.11. Поле осевой скорости v_z (t = 3c) Рис.12. Поле турбулентной вязкости μ (t = 3c)

 $R = \frac{vD}{v} = \frac{10 \frac{m}{c} \cdot 0.4 \frac{m}{10^{-6} \frac{m^2}{c}}}{10^{-6} \frac{m^2}{c}} = 4 \cdot 10^6 >> 2300$. В случае ламинарного течения на стенках трубы движение частиц жидкости отсутствует (условие прилипания) и образуется вязкий пограничный слой (ПС), в котором на расстоянии δ скорость скачком, но монотонно, увеличивается от 0 до скорости осреднённого движения v. Однако, даже в переходной зоне от ламинарного движения к турбулентному как показала профессор Московского университета Сперанская А.А., происходит периодический отрыв ПС[1]. Турбулентный вихрь имеет скорость частиц у стенки превышающих скорость осредненного движения, т.е. скорость монотонно падает от максимального значения v_{zm} на вязком подслое у стенки до минимальной скорости осреднённого движения v на расстоянии δ от стенки.

В цилиндрической системе координат уравнение динамики на ось z для вязкой жидкости имеет вид[2]:

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_{\varphi}}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \varphi} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right)$$
(1)

Тогда в стационарном случае $\frac{\partial v_z}{\partial t} = 0$,пренебрегаем силами инерции, в приближении аксиальной симметрии $v_r \ll v_z$, $\frac{\partial v_z}{\partial \varphi} = 0$, $\frac{\partial^2 v_z}{\partial \varphi^2} = 0$, $\partial r \sim \delta \ll z$. В итоге в уравнении остаются 2 слагаемых - силы вязкого трения и сила обусловленная градиентом давления для 1(6) фаз вращения, уравновешивающие друг друга вдоль оси цилиндра. Оценим первый и второй дифференциалы монотонно изменяющегося профиля скорости в пограничном слое $|\partial v_z| = |v_{zm} - v| \leq |v_{zm}|, |\partial^2 v_z| = |v_z(R) + v_z(R - \delta) - 2v_z(R - \delta/2)| = |v_{zm} + v - 2v_z(R - \delta/2)|.$ $v_{zm} \geq v_z(R - \delta/2) \geq v > 0 \Leftrightarrow -2v_{zm} \leq -2v_z(R - \delta/2) \leq -2v, \Leftrightarrow -v_{zm} \ll -2v_{zm} + v_{zm} + v \leq -2v_z(R - \delta/2) + v_z(R - \delta/2)$

Тогда получим

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) \right), \partial^2 v_z \approx v_z, \partial r \approx \delta, r \approx R, \frac{\overline{\partial p}}{\partial z} \approx \frac{\Delta p_z}{z}, v(R) = v_{zm}, v(R - \delta) = v \ll v_{zm}$$
(2)

Усредняя по объёму ПС уравнение (2), получим уравнение (3)

$$\frac{\Delta p_z}{z} = \frac{\mu \overline{\partial^2 v_z}}{\delta^2} \approx \frac{\mu v_{zm}}{\delta^2} \Longrightarrow \delta(z) \approx \sqrt{\frac{\mu z v_{zm}}{\Delta p_z}} = \sqrt{\frac{30 \kappa z / Mc \cdot 3M \cdot 8, 8M / c}{70000 \Pi a}} \approx 10,6 cM$$
(3)

В последней оценке использовались значения профилей рис.6($\Delta p_z = 70000\Pi a$), рис.12($\mu = 30\kappa^2/Mc$), рис.1 (z = 3M), рис.10($v_{zm} = 8.8M/c$). Толщина ПС $\delta \approx 10.6cM$ по

порядку величины согласуется с профилем рис.10($\delta \approx R = 20 cm$). Учёт сил инерции дает такой же вклад $\delta \sim 10 cm$. Кроме того, из формулы(3) следует зависимость толщины турбулентного ПС δ от расстояния z по потоку $\delta(z) \approx \sqrt{\frac{\mu v_{zm}}{\Delta p_z}} \sqrt{z} = C\sqrt{z}$, т.е. закон квадратного корня из z, закон также подтверждает рис.10 (изолиния v(z, y) = 1,25m/c = const). Рисунки 9,10,11,12 экспериментально доказывают результат работы [1], а именно, турбулентные вихри рождаются исключительно на стенках модели при движении жидкости.

Полученные модельные результаты могут применяться для тестирования узлов оборудования трубопроводной сети на прочность под действием длительного быстропеременного давления для транспорта нефти, воды и других жидкостей.

Литература

1.Сперанская А. А. Пограничные слои в геофизической гидродинамике. Диссертация доктора физико-математических наук: 01.04.12.-Москва, 1982.-345 с.: ил. Геофизика.

2.Ландау Л.Д., Лифшиц М.Е. Теоретическая физика: Учеб. пособ.: Т.6. Гидродинамика.-М.:Физматлит,2001.-736 с.

3.Пастухов Д.Ф. Классификация профилей температуры в плюс – минус одно сантиметровом слое от поверхности раздела геотермального озера. Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия.1995. №6. С 85-89.

4.Голубева О.В., Ехилевский С.Г., Федченко Т.Н., Лесовая Т.Ю., Зязюля П.В., Пастухов Ю.Ф., Пастухов Д.Ф. Метод подобия в однопараметрических задачах линейного программирования. Модернизация Российской экономики. Прогнозы и реальность. Сборник научных трудов 2 международной научно – практической конференции. – СПб.: Издательство Санкт-Петербургского академического университета,2016. С 90-95.

5. Сперанская О.А. Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Волосова Н.К. Московский государственный технический университет ИМ Н.Э.Баумана(г.Москва),Российская Федерация, Пастухов Д.Ф., Пастухов Ю.Ф., Соловьёв О.В., Ехилевский С.Г., Радкевич Д.С. Полоцкий А.А., Голубева государственный университет, Республика Беларусь. Научно _ пракктическая конференция информационно-коммуникационные технологии: достижения, проблемы, инновации (ИКТ -2018).Новополоцк.С.73-79

Дмитрий Феликсович Пастухов, Наталья Константиновна Волосова,

Юрий Феликсович Пастухов

ПОСТРОЕНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ МОДЕЛЕЙ

В ОБОЛОЧКЕ ANSYS FLUENT

Новополоцк

2018