### МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Физико-механический факультет Кафедра гидроаэродинамики

Диссертация допущена к защите Зав. кафедрой, проф., д.ф.-м.н. \_\_\_\_\_Смирнов Е.М. "\_\_\_\_\_ 2012 г.

# Расчет течения вдоль пучка цилиндров при наличии локальных завихрителей потока

## Диссертация на соискание ученой степени магистра по направлению 010600 – Прикладные математика и физика

Выполнил студент гр. 6054/11 Руководитель, к.ф.-м.н., доцент Матюшенко А.А. Гарбарук А.В.

Санкт-Петербург 2012

#### Оглавление

1	Усл	овные обозначения	3
2	Вве	дение	4
	2.1	Атомная энергетика	4
	2.2	Экспериментальная установка	8
3	Пос	тановка задачи	12
	3.1	Расчетная область и параметры течения	12
	3.2	Определяющие уравнения и моделирование турбулентности	14
	3.3	Используемый расчетный код	15
4	Мет	одические расчеты	17
	4.1	Расчет развитого течения	17
	4.1.1	RANS pacyet	17
	4.1.2	WMLES pacyet	21
	4.1.3	Сравнение с экспериментом	24
	4.2	Исследования сеточной сходимости и влияния численных параметров	26
	4.2.1	Постановка задачи	26
	4.2.2	Исследование влияния вычислительных параметров	28
	4.2.3	Исследование сходимости по сетке	30
	4.2.4	WMLES pacyet	32
	4.2.5	Выводы к методическим расчетам	35
5	Pacy	нет в полной области	36
	5.1	Картина течения	36
	5.2	Сравнение с экспериментом	39
6	Закл	іючение	43
7	Спи	сок литературы	44

## 1 Условные обозначения

b	Периметр смачиваемой поверхности
CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Число Куранта
$D_{\mathrm{H}}$	Гидравлический диаметр
FD	Полная область
LES	Large Eddy Simulation
Р	Шаг стрежней в 5х5 массиве
PD	Ячейка периодичности
RANS	Reynolds Averaged Navier Stocks
S	Площадь смачиваемой поверхности
SST (-CC)	Shear Stress Transport (with Curvature Correction)
URANS	Unsteady RANS
VM	Vertex Method
WMLES	Wall-Modeled Large Eddy Simulation

δ Толщина пограничного слоя

#### 2 Введение

#### 2.1 Атомная энергетика

В настоящее время вычислительная гидродинамика (CFD) широко используется в различных отраслях техники и получает признание как потенциально ценный инструмент для анализа сложных течений и явлений теплопередачи, имеющих отношение к безопасности ядерных установок. Международные организации способствуют использованию CFD в области ядерной энергетики, которая за последние несколько десятков лет стала одной из основных отраслей энергетики в промышленно развитых странах, таких как EC, Китай, Россия, США и.т.д. Эти страны производят от 16% до 80% электроэнергии на атомных электростанциях. В настоящее время в мире используются несколько типов реакторов по классификации МАГАТЭ<sup>1</sup> [1]:

- PWR Pressure Water Reactor, водо-водяной ядерный реактор является наиболее распространенным в мире типом ядерных реакторов (около 62%). Энергоблоки строят организации и компании:Westinghouse (сейчас ей владеет Toshiba), GeneralElectric, Areva, KraftwerkUnion (часть Siemens, которая сейчас передана в Areva), Babcock&Wilcox, ABB, CombustionEngineering (компания стала в 80-е частью ABB, a сейчас входит вWestinghouse), Toshiba, Mitsubishi Heavy Industries, Hitachi. Также в некоторых странах существуют «национальные» модели PWR: в России ВВЭР (полностью собственная технология, строят подразделения Росатома), в Китае CNP и CPR (основаны на западных технологиях с 30-70% китайского оборудования, строит CNNC), в Южной Корее OPR (технология скопирована с западной, но оборудование в последних блоках полностью своё, строят совместно KEPCO и Doosan Heavy Industries&Construction).
- BWR Boil Water Reactor, корпусной кипящий реактор, второй по распространенности в мире тип ядерных реакторов (около 20%). Строят те же американские, немецкие и японские компании, что и перечислены выше. В Японии функционируют также ABWR, усовершенствованные реакторы этого типа.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>МАГАТЭ – Международное Агентство по Атомной Энергетике

- PHWR Pressurised Heavy Water Reactor, тяжеловодный ядерный реактор. Реакторы этого типа в основном известны под названием CANDU, это национальное канадское направление ядерной энергетики, которое успешно выступает на международном рынке, так как канадцы открыто работают в плане технологий. Страны, в которых построены PHWR, способны производить самостоятельно топливо для этих реакторов, так как оно не требует сложного высокотехнологичного процесса обогащения. PHWR также строил Siemens, но в настоящее время действует лишь один немецкий реактор в Аргентине. Кроме Германии и Канады единственной страной, самостоятельно развившей технологию тяжеловодных реакторов, является Индия, которая строила их только у себя в стране.
- GCR Gas-Cooled Reactor, газоохлаждаемый реактор. Национальное направление ядерной энергетики Великобритании, которая активно строила модификации Magnox и AGR, однако большинство из них в настоящий момент закрыто. Также несколько реакторов этого типа англичане построили в Италии и Японии, однако все они уже не работают.
- LWGR Light water graphite reactor, графито-водный ядерный реактор.
  Исключительно советское направление в реакторостроении. Энергоблоки с реакторами этого типа, РБМК и маломощными ЭГП-6 строились только в СССР, последний был пущен в 1990 году. Довольно большое их количество эксплуатируется по настоящее время в России, а работавшие на Украине и в Литве энергоблоки были закрыты.
- FBR Fast Breeder Reactor, реактор-размножитель на быстрых нейтронах. Реакторы этого типа были разработаны и функционировали в нескольких странах, однако в настоящий момент работает лишь единственный в мире, БН на Белоярской АЭС в России. В США, Франции, Японии и Казахстане реакторы были закрыты, однако в мире имеется большой интерес к этой технологии.

Таким образом, более 80% в мире составляют водо-водяные ядерный реакторы, использующие в качестве замедлителя и теплоносителя обычную (лёгкую) воду. Технология изготовления таких реакторов хорошо изучена и отработана. Невоспламеняемость и невозможность затвердевания воды упрощает проблему эксплуатации реактора и вспомогательного оборудования. Обычная химически обессоленная вода дешева, и ее использование обеспечивает безопасность эксплуатации реактора. Три четверти водоводяных реакторов составляют реакторы с водой под давлением PWR (Pressurized Water Reactor), российская версия которых называется ВВЭР. Типичная схема работы такого реактора представлена на рисунке Рис. 1.



Рис. 1. Схема работы водо-водяного ядерного реактора

Активная зона водо-водяного реактора изображена на рисунке Рис. 2. Она состоит из тепловыделяющих сборок (ТВС), заполненных пластинчатыми или цилиндрическими тепловыделяющими элементами - ТВЭЛами. Корпус ТВС изготовляют из листового материала (алюминия, циркония), слабо поглощающего нейтроны. Сборки размещают в цилиндрической клетке, которая вместе со сборками помещается в корпус реактора. Кольцевое пространство между ним и внешней стенкой клетки, заполненное водой, играет роль отражателя. Таким образом, вода, проходя снизу вверх через зазоры между тепловыделяющими элементами, охлаждает их, являясь одновременно теплоносителем, замедлителем и отражателем. Корпус реактора рассчитывается на прочность, исходя из давления воды. Горловина корпуса закрывается герметической крышкой, которая снимается при загрузке и выгрузке тепловыделяющих сборок.



- 1 привод системы управления и защиты;
- 2 крышка реактора;
- 3 корпус реактора;
- 4 блок защитных труб (БЗТ);
- 5 шахта;
- 6 выгородка активной зоны;
- 7 топливные сборки, регулирующие стержни.

Рис. 2. Активная зона ядерного реактора

В мировой практике проектирования и производства ТВС для АЭС с ВВЭР, с целью выравнивания температуры оболочки ТВЭЛ и увеличения запасов кризиса кипения, в качестве интенсификаторов теплообмена используются дистанцирующие и перемешивающие решетки с завихрителями потока, показанные на рисунке Рис. 3. Такие решетки обеспечивают дополнительную турбулизацию теплоносителя и перераспределение его по сечению сборки. С точки зрения гидродинамики дистанцирующие и перемешивающие решетки обеспечивают местное возмущение потока за счет нарушения однородности проходного сечения и отклонения направления конвективных потоков. Они приводят к изменению скорости, интенсификации турбулентных характеристик и локальных процессов переноса импульса и тепла в целом [2].



Рис. 3. Дистанцирующие перемешивающие решетки с завихрителями потока

Проблема расчета подобных течений является актуальной, наиболее перспективной и быстро развивающейся областью CFD применительно к задачам мирной ядерной энергетики. С гидродинамической точки зрения, точное предсказание полей скорости и моделирование турбулентности в пучке стержней с завихрителями потока является достаточно сложной задачей. Для этого требуется использование достаточно подробной сетки, которая хорошо разрешает особенности течения в области лопаток решетки завихрителей, где поток существенно закручивается, турбулизируется и зарождаются интенсивные вихри. Измельчение сетки также требуется в окрестности стенок для разрешения пограничных слоев. Кроме того, моделирование сильно закрученного течения на выходе из решетки завихрителей требует выбора оптимального подхода к описанию турбулентности, чтобы соблюсти разумный баланс между точностью решения и вычислительными затратами.

#### 2.2 Экспериментальная установка

В апреле 2011 года рабочая группа по анализу и управлению аварий (WGAMA<sup>2</sup>) инициировала проведение "OECD / NEA<sup>3</sup> CFD теста для турбулентного потока в пучке стержней с локальными завихрителями потока", основанного на экспериментах. выполненных на экспериментальной установке MATiS-H<sup>4</sup> в Корейском научноисследовательском институте атомной энергии (КАЕRI<sup>5</sup>) [3],[4]. МАТіS-Н предназначена для выполнения гидравлических испытаний в массиве цилиндров (5x5) при нормальном давлении и постоянной температуре. Основной ее целью является подробное изучение структуры турбулентного течения на выходе из решетки завихрителей, поскольку они широко используются в тепловыделяющих сборках ядерных реакторов. На рисунке Рис. 4 показана схема данной установки. Рабочая часть экспериментальной установки состоит из горизонтально расположенной сборки цилиндров 5x5, расположенной в квадратном канале размером 170 х 170 мм (Рис. 5). С целью лучшего разрешения структуры течения в субканалах при помощи LDA, тестовая конфигурация в 2.67 раза превосходит размер реальной конструкции стержней, и состоит из 25 стержней длинной 4м и диаметром 25,4 мм каждый. Эти цилиндры располагаются в матрице с шагом Р = 33.12 мм и 18.76 мм в пристеночной

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> WGAMA – Working Group of the Analysis and Management of Accidents

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> OECD / NEA – Organisation for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> MATiS-H – Measurements & Analysis of Turbulence in Subchannels – Horizontal

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> KAERI – Korea Atomic Energy Research Institute

области. Таким образом, гидравлический диаметр канала, включая каскад цилиндров, D<sub>H</sub>= 24.27 мм<sup>6</sup>.



Рис. 4. Схема экспериментальной установки MATiS-H в KAERI

В качестве рабочей жидкости для всех MATiS-H экспериментов используется вода при температуре  $35^{\circ}$ C и давлении 156,9 кПа. Массовый расход во всех экспериментах поддерживался постоянным и составлял 24,2 кг/с., что соответствует среднерасходной скорости  $W_{bulk} = 1,5$  м/с. Таким образом, число Рейнольдса, построенное по среднерасходной скорости и гидравлическому диаметру составляет Re = 50250. Недалеко от входа в рабочую область экспериментальной установки для предотвращения поперечного перетекания и ускорения формирования развитого течения в каскаде цилиндров установлены выпрямители потока, показанные на рисунке 4 (d). Завихрители потока располагаются на расстоянии 100  $D_{\rm H}$  вниз по потоку после выпрямителей, т.е. течение перед ними можно считать полностью развитым.

 $<sup>^{6}</sup>D_{H} = 4 \cdot S / b = 4 \cdot (170^{2} - 25 \cdot \pi / 4 \cdot 25.4^{2}) / (25 \cdot \pi \cdot 25.4 + 4 \cdot 170) = 24_{MM}$ 





На рисунке Рис. 6 изображена конструкция завихрителей потока. Она представляла собой решетку 5х5 с лопатками для турбулизации потока, которая крепилась к каскаду цилиндров при помощи втулок. Поскольку измерения LDA<sup>7</sup>-устройством проводились в фиксированном сечении, для обеспечения измерений скорости и турбулентных характеристик в различных сечениях решетка завихрителей могла перемещаться в осевом направлении вдоль стержней. Более подробную информацию об измерениях и конструкции решетки завихрителей можно найти в описании OECD/NEA 2011 [5].



Рис. 6. Дистанцирующая перемешивающая решетка завихрителей потока сплиттипа, используемая в MATiS-H эксперименте

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> LDA - Laser Doppler Anemometry

Таким образом, целью данной работы является исследование возможностей современных подходов к моделированию турбулентности в рамках пакета ANSYS Fluent применительно к задаче об обтекании пучка стержней с завихрителями потока на основе MATiS эксперимента. Следует отметить, что данная задача являлась "слепым" тестом, и экспериментальные данные были предоставлены после проведения CFD расчетов и предоставления результатов организаторам теста. Такой подход потребовал проведения тщательных методических расчетов, включая расчет методом моделирования крупных вихрей для оценки пригодности выбранной модели турбулентности для рассматриваемого течения.

#### 3 Постановка задачи

#### 3.1 Расчетная область и параметры течения

Расчетная область для CFD расчета выбиралась в окрестности дистанцирующей перемешивающей решетки (см. Рис. 5). Расчетная область и соответствующие сетки были созданы с использованием платформы ANSYS Workbench, а именно при помощи ANSYS Design Modeler (DM) и ANSYS Meshing, которые хорошо взаимодействуют между собой. Оригинальная конструкция решетки завихрителей была предоставлена как CAD файл в STP формате вместе с описанием MATiS теста и была импортирована в ANSYS DM. Все геометрические упрощения в конструкции завихрителей, подробное описание которых приведено ниже, также производилось в ANSYS DM.

Расчетная область, изображенная на рисунке 7, начинается на расстоянии 100 мм перед входом в решетку завихрителей, захватывает саму решетку и все экспериментальные сечения на расстоянии  $0.5D_H$ ,  $1D_H$ ,  $4D_H$  и  $10D_H$  вниз по потоку после лопаток нее. Итоговый размер расчетной области составлял 170 х 170 х 620 мм. В оригинальной конструкции существовали небольшие зазоры между втулками, стенками решетки завихрителей и внешней стенкой пучка стержней. Эти зазоры не оказывают существенного влияния не структуру течения, но вызывают большие трудности при построении расчетной сетки, поэтому этими зазорами было решено пренебречь. В итоге, втулки моделировались как сплошные цилиндры, а зазор между стенками решетки завихрителей и внешней стенкой отсутствовал (Рис. 8).



Рис. 7. Топология и параметры полной расчетной области



Рис. 8. Оригинальная и упрощенная топология расчетной области

В соответствии с условиями эксперимента расчеты проводились для течения несжимаемой изотермической жидкости, воды при температуре 35°С. Соответствующие физические свойства воды и параметры течения приведены в таблице 1.

Плотность	ρ = 1.0 [кг·м <sup>-3</sup> ]
Динамическая вязкость	$μ = 5 \cdot 10^{-6} [κr·m^{-1}·c^{-1}]$
Среднерасходная скорость	W <sub>bulk</sub> =1.5 [м/с]
Гидравлический диаметр	D <sub>H</sub> = 24.5 [мм]
Число Рейнольдса	$\operatorname{Re} = \frac{W_{bulk} \cdot D_H}{\upsilon} = 50250$

Таблица 1. Физические свойства воды и параметры течения

#### 3.2 Определяющие уравнения и моделирование турбулентности

После того как развитое течение попадает в решетку завихрителей оно достаточно сильно меняет свою структуру. Первое существенное изменение происходит при обтекании первого ряда втулок у входа в решетку завихрителей. Течение в окрестности втулки представляет собой поперечное обтекание цилиндра при числе Рейнольдса, построенному по среднерасходной скорости и диаметру цилиндра порядка 10<sup>4</sup>. На рисунке Рис. 9 показано продольное сечение расчетной области в окрестности решетки завихрителей.





Следует отметить, что втулки располагаются между твердыми стенками. Поэтому, несмотря на высокое число Рейнольдса, априори утверждать, что обтекание втулок является нестационарным с образованием дорожки Кармана в следе за цилиндром затруднительно. В работе [6] было показано, что при данном расположении цилиндров и твердых стенок, течение является нестационарным с образованием дорожки Кармана в следе за цилиндром. Следовательно, данную задачу следует решать с использованием нестационарных подходов.

В настоящей работе использовались 2 подхода. Первый из них – решение нестационарных уравнений Рейнольдса (URANS подход) [7]. Для замыкания этих уравнений использовалась хорошо зарекомендовавшая себя на широком классе задач k- $\omega$  SST модель турбулентности Ментера. Поскольку линии тока в рассматриваемом потоке значительно изогнуты на выходе из решетки завихрителей, использовались модификация модели с поправкой на кривизну линий тока (k- $\omega$  SST-CC модель) [8]. Другой подход – метод крупных вихрей с пристеночным RANS моделированием, замкнутый при помощи алгебраической модели турбулентности – WMLES [9]. Этот вихреразрешающий подход более достоверно описывает характер течения, но требует гораздо больше вычислительных ресурсов.

#### 3.3 Используемый расчетный код

Все CFD расчеты проводились при помощи коммерческого кода ANSYS Fluent 14.0. В таблице Таблица 2 приведены схемы дискретизации, шаг по времени и время осреднения, которые использовались при расчете для различных подходов к моделированию турбулентности. Различия обусловлены тем, что в рамках URANS все турбулентные вихри разрешаются, а в рамках WMLES часть вихрей моделируется. В частности, это ведет к необходимости использовать менее диссипативные схемы в рамках WMLES.

Шаг по времени для URANS подхода выбирался так, чтобы разрешалась вихревая дорожка Кармана в следе за втулками (40 точек на период, соответствующий числу Струхаля St=0.2 [10]). Для WMLES расчета шаг по времени выбирался таким, чтобы разрешать наименьшие турбулентные структуры. Для обеспечения этого, число Куранта, построенное на основе продольного шага сетки должно быть порядка 1.

		URANS	WMLES	
rpы	Характерное время осреднения	1 [c]		
apame	Шаг по времени	0.5 [мс]	0.1 [мс]	
Временные п	Количество итераций на шаг по времени	5	10	
	Алгоритм совместного решения уравнений движения и неразрывности	Coupled	SIMPLEC	
хемы	Градиент	Green-Gauss cell based (GGCB)		
нные (	Давление	Схема вто	рого порядка	
Числе	Уравнение движения	Противопоточная схема второго порядка	Центрально-разностная схема	
	Уравнения для турбулентных характеристик	Противопоточная схема второго порядка		

#### Таблица 2. Вычислительные параметры

#### 4 Методические расчеты

Для исследования влияния расчетной сетки и вычислительных параметров была проведена серия методических расчетов. Поскольку расчетная область в поперечном сечении имеет периодическую структуру (за исключением окрестности внешней стенки канала), вычислительные затраты при проведении методических расчетов можно существенно сократить, проводя эти исследования в периодической ячейке. Расчетная область для такой минимально возможной ячейки в 12.5 раз меньше полной области и показана на рисунке Рис. 10.



Рис. 10. Поперечное сечение решетки завихрителей в полной области (слева) и ячейки периодичности (справа)

#### 4.1 Расчет развитого течения

Основной целью данного расчета была оценка возможностей различных подходов к моделированию турбулентности при расчете развитого течения в пучке цилиндров.

Другой, не менее важной целью, является исследование влияния боковых стенок канала на течение в центральных ячейках периодичности.

Наконец, результаты расчетов развитого течения необходимы для задания входных граничных условий при расчете течения сквозь решетку завихрителей потока.

#### 4.1.1 RANS расчет

Расчетная область представляла собой поперечное сечение пучка (см. Рис. 11). При расчете течения в периодической ячейке в плоскости ХУ использовались периодические

граничные условия. Поскольку FLUENT является трехмерным кодом, область состояла из 3 ячеек сетки по направлению течения, а использование периодических граничных условий с заданным расходом по направлению оси Z позволяет воспроизвести экспериментальные условия (для полной области величина расхода составила 24.2 кг/с, а для ячейки периодичности – 1.96 кг/с). Используемые расчетные стеки предоставлены на рисунке Рис. 12, в таблице 3 приведены их основные параметры.



*Рис. 11.* Расчетная область и граничные условия *RANS* расчета развитого течения



Рис. 12. Расчетные сетки для полной (угловой фрагмент) и периодической области

Параметр	Полная область	Ячейка периодичности
Глубина экструзии, мм	1	1
Общее число ячеек	500 K	20 K
Ячейки ХҮ сечения	170 K	7 K
Количество ячеек в продольном направлении	3	3
Макс. <b>ΔY</b> <sub>1</sub> <sup>+</sup>	1.5	1.5

Таблица 3. Структура и параметры расчетных сеток

На рисунках Рис. 13 и Рис. 14 представлены контуры и профили средней скорости для полной (5х5 цилиндров) области и ячейки периодичности соответственно. Видно, что решения в центральной части полной области и периодической ячейки идентичны. Это свидетельствует о том, что влияние боковых стенок канала ограничивается их непосредственной окрестностью и не распространяется на центральные межцилиндровые зазоры. Соответственно, выводы о расчетных сетках и вычислительных параметрах, сделанные на основе представленных ниже методических расчетах для ячейки периодичности, справедливы и для задачи о течении в полной области.



Рис. 13. Контуры средней продольной компоненты скорости развитого течения



Рис. 14. Профили скорости и турбулентных характеристик для полной области и ячейки периодичности

#### 4.1.2 WMLES расчет

Использование метода моделирования крупных вихрей предполагает проведение полноценного трехмерного расчета, поэтому расчет проводился в минимально возможной ячейке периодичности. Длина расчетной области составляет 4 межцилиндровых зазора и соответствует расстоянию от входной границы до начала решетки завихрителей основной задачи (Рис. 15). В плоскости ХҮ использовались периодические граничные условия, а на выходной границе задавалось постоянное давление.

Известно, что одной из наиболее существенных проблем при использовании метода LES является задание нестационарных граничных условий на входной границе [11]. В настоящей работе для создания турбулентных пульсаций использовался Vortex Method (VM) [12]. Профили средней скорости и турбулентных характеристик, необходимые при использовании данного метода, были взяты из решения задачи, рассмотренной в п.4.1.1.



*Рис. 15.* Расчетная область и граничные условия WMLES расчета развитого течения

Продольный и поперечный шаги расчетной сетки выбирались из соответствия сеткам для WMLES [12] и составляли 0.1 и 0.05 размера межцилиндрового зазора соответственно. Эти требования ведут к существенно более мелкой сетке, чем для RANS расчетов (Таблица 4 и Рис. 16).

Глубина экструзии, мм	Общее число ячеек	Ячейки ХҮ сечения	Количество ячеек в продольном направлении	Мин объем ячейки / δ	Макс объем ячейки / б	Макс. ΔΥ <sub>1</sub> +
88	~2 M	8.5 K	220	4e-05	1e-03	1.5

Таблица 4. Параметры WMLES сетки для развитого течения



Рис. 16. Расчетная сетка для WMLES расчета развитого течения

Мгновенные картины гидродинамических характеристик течения на рисунке Рис. 17 свидетельствуют о наличии разрешенных турбулентных структур. Профиль средней скорости в окрестности выходной границы практически идентичен результатами RANS, однако в профиле кинетической энергии турбулентности наблюдаются некоторые различия (Рис. 18). Тем не менее, в целом можно констатировать хорошее соответствие результатов RANS и WMLES расчетов для развитого течения в пучке труб.



Рис. 17. Мгновенные картины турбулентного развитого течения



*Рис. 18.* Профили скорости и турбулентных характеристик с использованием различных подходов к моделированию турбулентности

#### 4.1.3 Сравнение с экспериментом

Экспериментальные LDA измерения для развитого течения проводились в 3 межцилиндровых зазорах на расстоянии  $90D_H$  вниз по потоку после выпрямителя (Рис. 19). Профили гидродинамических и турбулентных характеристик были предоставлены вдоль линий, соответствующих у = 0.5P /1.5P / 2.5P, где P = 33.12 мм - шаг стержней в массиве 5x5.



*Рис. 19.* Измерения полностью развитого течения на расстоянии 90D<sub>H</sub> от выпрямителя потока

Из рисунка Рис. 20 видно, что экспериментального поля продольной компоненты скорости хорошо согласуется с результатами RANS решения в полной области. Сравнение осредненных по времени профилей скорости и турбулентных характеристик для всех представленных выше расчетов с экспериментальными данными вдоль трех линий приведено на рисунке Рис. 21. Видно, что независимо от подхода к моделированию турбулентности, наблюдается хорошее соответствие результатов расчетов экспериментальными данными данными.



Рис. 20. Контуры осредненной продольной компоненты скорости развитого течения в полной области



Рис. 21. Профили скорости и турбулентных характеристик вдоль различных линий для полной области и ячейки периодичности с использованием различных подходов к моделированию турбулентности

Таким образом, проведенная серия расчетов развитого течения в пучке цилиндров позволяет сделать следующие выводы.

- 1. RANS решения в центральной части полной области и в ячейке периодичности практически идентичны.
- 2. Результаты WMLES и SST-CC RANS расчетов близки друг к другу;
- Профили скорости и кинетической энергии турбулентности хорошо согласуются с экспериментальными данными для всех подходов.

#### 4.2 Исследования сеточной сходимости и влияния численных параметров

#### 4.2.1 Постановка задачи

Как уже было сказано, методические исследования влияния сеточных и вычислительных параметров при расчете течения сквозь решетку завихрителей проводились в ячейке периодичности. В разделе 4.1 было показано, что влияние боковых стенок канала не распространяется в центральные ячейки, поэтому такой подход вполне оправдан.

Расчетная область вместе с граничными условиями показана на рисунке Рис. 22. На твердых стенках использовались пристенные функции, на выходе из расчетной области задавалось постоянное статическое давление. Граничные условия на входной границе зависели от используемого подхода. Так, при использовании SST-CC URANS задавались профили развитого течения, полученные в разделе 4.1. В случае WMLES, как и в разделе 4.2, использовались нестационарные граничные условия, полученные при помощи VM с использованием профилей развитого течения.



Рис. 22. Расчетная область и граничные условия для периодической ячейки

Сложность формы завихрителей потока делает практически невозможным построение качественной структурированной сетки, поэтому применялся двухэтапный подход к построению гибридной сетки. На первом этапе в наиболее проблемной области в окрестности решетки завихрителей строилась тетраидная неструктурированная сетка с призматическими слоями вблизи стенок для разрешения пограничного слоя. На втором этапе в остальной области на базе уже построенной сетки вытягивались призматические ячейки. На рисунке Рис. 23 показана топология расчетной сетки и образования вихревых структур на выходе из решетки завихрителей потока.



*Рис. 23.* Топология расчетной сетки и образование вихрей на выходе из решетки завихрителей

Для исследования сеточной сходимости решения и сравнения различных моделей турбулентности были построены четыре различные сетки T1-T4 (см. таблицу Таблица 5). Следует отметить, что сетка T4 удовлетворяет критериям для WMLES вычислений. В частности, отношение продольного и поперечного шага сетки к толщине пограничного слоя составляло 0.1 и 0.05 соответственно.

	T1	T2	Т3	T4
Количество ячеек	1.6M	2.5M	7.6M	40M
Макс. $\Delta Y_1^+$	17	13	8	5
Сред. $\Delta Y_1^+$	7	5	3	1.5
Мин. ячейка, мм <sup>3</sup>	0.05	0.04	0.03	0.001
Макс. ячейка, мм <sup>3</sup>	2	2	2	1

Таблица 5. Расчетные сетки и их параметры

#### 4.2.2 Исследование влияния вычислительных параметров

Важным вопросом при проведении нестационарных расчетов является выбор достаточной глубины сходимости итераций и времени для получения статистически установившегося течения. Эти исследования проводились для сеток T1-T3.

На рисунке Рис. 24 приведены истории сходимости решения для различного числа итераций, полученные с использованием сетки Т3. Несмотря на существенное увеличение глубины сходимости решения для 10 итераций на шаг по времени по сравнению с 5 итерациями (~1 порядок), осредненные характеристики течения, показанные на рисунке Рис. 25, практически идентичны. Поэтому, что для дальнейших расчетов использовались 5 итераций на шаг по времени.



Рис. 24. История сходимости решения для различного числа итераций

Другим важным параметром, влияющим на точность результатов расчета, является время осреднения нестационарного решения. На рисунке Рис. 26 приведены результаты для двух различных времен осреднения:  $T_s=1c$  (50 периодов вихревой дорожки фон Кармана за втулками) и  $T_s=2c$  (100 периодов). Видно, что профили скорости почти идентичны, поэтому в дальнейшей серии расчетов осреднение проводилось по  $T_s=1c$ .



Рис. 25. Влияние количества итераций на шаг по времени на решение в различных сечениях после завихрителей



*Рис. 26.* Исследование влияния времени осреднения на решение в различных сечениях после завихрителей

#### 4.2.3 Исследование сходимости по сетке

Наконец, при исследовании MATiS-H теста самым важным вопросом является вопрос о достаточном пространственном разрешении используемой расчетной сетки. Эти исследования проводились для URANS подхода с SST-CC моделью турбулентности с использованием всех четырех расчетных сеток. Сравнение результатов этих расчетов для осредненных по времени компонент скорости в различных сечениях приведено на рисунке Рис. 27. Как видно из рисунка, результаты для сеток T3 и T4 достаточно хорошо согласуются

между собой и, следовательно, сетка T3 является достаточной для получения сошедшегося по сетке решения. Дальнейшие результаты для SST-CC URANS подхода будут представлены на этой сетке или ее аналоге для полной области.



Рис. 27. Профили скорости в различных сечениях вниз по потоку после решетки завихрителей для различных моделей турбулентности на различных расчетных сетках

#### **4.2.4 WMLES расчет**

Общепризнано, что вихреразрешающие подходы наиболее достоверно предсказывают структуру и особенности турбулентного течения. Но, как уже говорилось, они требуют существенно больших вычислительных затрат, чем URANS подход. Так как MATiS тест являлся "слепым" тестом и экспериментальные данные не были доступны во время проведения расчетов, то априори сказать, насколько точна модель SST-CC применительно к подобным течениям было затруднительно. Для качественной оценки точности SST-CC URANS результатами был проведен WMLES расчет.

Картины мгновенного распределения продольной компоненты скорости демонстрируют интенсивные вихревые структуры вниз по потоку после решетки завихрителей (Рис. 28). Эволюция развития этих вихревых структур, осредненных по времени, показана на рисунке Рис. 29. На этих рисунках видно, что крупные вихревые структуры в центре канала и сравнительно небольшие в окрестности стенок цилиндров разрешаются для обоих подходов к моделированию турбулентности и достаточно хорошо согласуются между собой.



Контуры мгновенной продольной компоненты скорости для различных моделей турбулентности



Эволюция завихренности вниз по потоку после решетки завихрителей для различных моделей турбулентности

На рисунке Рис. 30 показаны профили осредненных компонент скорости как непосредственно вблизи лопаток завихрителей, где происходит зарождение вихрей, так и на достаточном удалении вниз по потоку, где интенсивность основного вихря заметно уменьшается. Профили скорости для обоих подходов не имеют существенных различий между собой, за исключением небольшой области в небольшом межцилиндровом зазоре для продольной составляющей скорости в непосредственной близости от лопаток завихрителей. Таким образом, есть все основания полагать, что SST-CC модель турбулентности обеспечивает достаточную точность при расчете завихрителей потока.



турбулентности в различных сечениях вниз по потоку после решетки завихрителей

#### 4.2.5 Выводы к методическим расчетам

- Серия методических расчетов позволила определить оптимальные вычислительные параметры и время осреднения при проведении SST-CC URANS расчетов.
- Сетка ТЗ является достаточной для получения сошедшегося по сетке SST-CC URANS решения. Расчет в полной области следует проводить на аналоге сетки ТЗ (100 млн. ячеек).

SST-CC URANS обеспечивает достаточно высокую точность расчета рассматриваемых течений, и использование этого подхода является вполне обоснованным.

#### 5 Расчет в полной области

#### 5.1 Картина течения

SST-CC URANS расчет в полной области был проведен с использованием опыта, полученного при проведении методических расчетов. На рисунке Рис. 31 представлена мгновенная картина течения на примере продольной компоненты скорости в 2 сечениях. Первое располагалось в центре расчетной области (x = 14 мм). В этом сечении наблюдается отрывная зона между внешней стенкой канала лопатками завихрителей. Во втором сечении, расположенном непосредственно вблизи внешней стенки канала (x = 80 мм), наблюдается массированная зона отрыва.



Рис. 31. Мгновенная картина течения в различных сечениях

На рисунке Рис. 32 показаны вихревые структуры, порожденные решеткой завихрителей. На выходе из решетки образуется один основной вихрь в центре суб-канала и два дополнительных вихря, расположенных между цилиндрами. Эти вихри хорошо видны на рисунке Рис. 33, представляющем эволюцию вихревого течения после решетки завихрителей, причем завихренность в них больше, чем в основном вихре. Также следует отметить, что непосредственно вблизи лопаток завихрителей (Z=0.5D<sub>H</sub>) основные вихри имеют вытянутую форму. Вниз по потоку вихри становятся более круглыми, при этом их интенсивность заметно уменьшается



*Рис. 32.* Вихревые структуры за решеткой завихрителей, на примере линий тока в цветовой палитре продольной компоненты скорости.



Рис. 33. Контуры завихренности в различных сечениях после завихрителей для полной области и ячейки периодичности

На рисунке Рис. 34 представлены осредненные по времени профили продольной компоненты скорости в различных сечениях после завихрителей вдоль линии Y = 0.5P для полной области и ячейки периодичности. Видно, что в непосредственной близости от лопаток завихрителей профили хорошо согласуются друг с другом, однако вниз по течению различие увеличивается. Причиной такого поведения может быть влияние внешней стенки канала или «несинхронность» дорожек Кармана в различных ячейках в полном расчете.



Рис. 34. Профили скорости в различных сечениях вниз по потоку после решетки завихрителей для полной области и ячейки периодичности

#### 5.2 Сравнение с экспериментом

На рисунке Рис. 35 изображены осредненные по времени контуры продольной компоненты завихренности на выходе из решетки завихрителей, полученные в расчете и в эксперименте. Видно, что интенсивности основного вихря в расчете и эксперименте близки между собой, однако форма этого вихря отличается. Так, вихрь, полученный в расчете, более вытянут, причем направление этого вытягивания составляет примерно 15 градусов от диагонального направления. В то же время в эксперименте вихрь вытянут под углом 45 градусов, причем гораздо слабее. Провести сравнение вторичных вихрей затруднительно, поскольку экспериментальные данные в окрестности твердых стенок отсутствуют.



Рис. 35. Контуры завихренности на выходе из решетки завихрителей (Z=0.5D<sub>H</sub>)

Количественные сравнение профилей скорости и нормальных напряжений проводилось вдоль линий, представленных на рисунке Рис. 36.



Рис. 36. Линии, вдоль которых производились экспериментальные измерения

Профили скорости на выходе из решетки завихрителей и на удалении вниз по потоку от нее в различных сечениях представлены на рисунке Рис. 37 и Рис. 38 соответственно. Непосредственно вблизи лопаток завихрителей, где происходит зарождение интенсивных вихревых структур, профили поперечной компоненты скорости достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными. Следует отметить, что расчет предсказывает несколько большую амплитуду колебаний компонент вектора скорости в пространстве (Рис. 37). Причина этого до конца неясна и, скорее всего, состоит в неспособности URANS подхода описать мелкомасштабные детали течения в окрестности лопаток завихрителей. Это предположение подтверждается тем, что на удалении от решетки завихрителей согласование расчета и эксперимента заметно улучшается (Рис. 38).



сечениях



Рис. 38. Профили скорости на удалении вниз по потоку после решетки завихрителей завихрителей в различных сечениях

#### 6 Заключение

Турбулентное течение воды в каскаде стержней с локальными завихрителями потока было исследовано с использованием программного пакета ANSYS Fluent 14.0. Расчеты, проводившиеся с использованием нестационарных подходов URANS и WMLES, показали достаточно интенсивную сложную вихревую структуру течения, которая вырождается по мере удаления от решетки завихрителей.

Методические расчеты в периодической ячейке с использованием WMLES показали, что SST-CC URANS обеспечивает высокую точность при расчете подобных течений.

Результаты SST-CC URANS расчета в полной области достаточно хорошо согласуются с экспериментом, за исключением продольной компоненты скорости непосредственно на выходе из решетки завихрителей.

#### 7 Список литературы

- 1. Левин В.Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. Атомиздат (4-е издание) 1979
- 2. В.К. Артемьев, Н.В. Гусев, Ю.Н. Корниенко, Е.В. Корниенко. Обзор некоторых достижений в области экспериментально-расчетных исследований повышения эффективности решеточных интенсификаторов теплообмена в ТВС.
- 3. Chang, S. K., et al. Phenomenological investigations on the turbulent flow structures in a rod bundle array with mixing devices. Nucl. Eng. Design, Vol. 238. 2008, pp. 600-609.
- Kang, H. S., Chang, S. K. and Song, C.-H. CFD analysis of the MATiS-H experiments on the turbulent flow structures in a 5x5 rod bundle with mixing devices, Proc. CFD4NRS-3, Washington D.C., USA, Sept. 12-14, 2010. 2010. p. 10.
- 5. OECD/NEA. 2011. MATiS-H Benchmark Final Benchmark Specifications, pp. 44. 2011.
- Zovatto, L., & Pedrizzetti, G. (2001). Flow about a circular cylinder between parallel walls. Journal of Fluid Mechanics, 440, 1–25. Cambridge Univ Press. doi:10.1017/S0022112001004608
- 7. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа 3-е изд. (М.: Наука, 1970)
- 8. Smirnov PE, Menter FR. Sensitization of the SST Turbulence Model to Rotation and Curvature by Applying the Spalart–Shur Correction Term. Journal of Turbomachinery. 2009
- Shur, M. L., Spalart, P. R., Strelets, M. K., & Travin, A. K. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities. International Journal of Heat and Fluid Flow, 29(6), 1638-1649. Elsevier Inc. doi:10.1016/j.ijheatfluidflow. 2008.07.001
- 10. **B. Mutlu Sumer, Jorgen Fredsoe.** *Hydrodynamics around cylindrical structures. World Scientific Publishing Company.* 2006
- 11. Adamian DY, Travin AK. Assessment of an approach to generating inflow synthetic turbulence for LES of complex turbulent flows. In: 4TH EUROPEAN CONFERENCE FOR AEROSPACE SCIENCES (EUCASS).; 2011:6-13.
- 12. ANSYS Inc. ANSYS Fluent 14.0 Theory Guide. s.l. : ANSYS Inc., Canonsburg, USA, 2011.