

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО ОБТЕКАНИЯ ПУЧКА ЦИЛИНДРОВ С ЛОКАЛЬНЫМИ ЗАВИХРИТЕЛЯМИ ПОТОКА (OECD/NEA MATIS-H ТЕСТ)

Гарбарук А.В., Матюшенко А.А., Стрелец М.Х.
(СПбПУ, Санкт-Петербург, Россия)

Введение

Методы вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD), которые уже в настоящее время широко используются в различных областях техники, находят все большее признание как эффективный инструмент для анализа сложных гидродинамических и тепловых явлений, играющих важную роль в обеспечении безопасности атомных электростанций. Использование CFD в этой области стимулируется различными международными организациями. В частности, в 2011 г. рабочая группа по анализу аварий и управлению ими (Working Group on the Analysis and Management of Accidents - WGAMA) спонсировала проект OECD/NEA Sponsored CFD Benchmark Exercise: Turbulent Flow in a Rod Bundle with Spacers [1], направленный на тестирование CFD методов применительно к турбулентному обтеканию пучка цилиндрических стержней с локальными завихрителями путем сравнения результатов расчетов с «эталонными» экспериментальными данными, полученными на установке MATIS-H Корейского научно-исследовательского института атомной энергии (KAERI) [2, 3]. Данный тест является весьма репрезентативным для рассматриваемой области, так как течения рассматриваемого типа реализуются в системах охлаждения пучках ТВЭЛов ядерных реакторов.

Предложенный тест был «слепым», т.е. экспериментальные данные не были известны участникам проекта до проведения расчетов и предоставления их результатов организаторам проекта. В ходе расчетов необходимо было определить скорости и турбулентные характеристики однофазного изотермического потока в различных точках продольного обтекаемого пучка параллельных цилиндрических стержней (5×5) с решетками завихрителей двух типов (“split” и “swirl”). С точки зрения гидродинамики, расчетное определение деталей этого течения, в частности, соответствующих полей скорости и характеристик турбулентности, является очень сложной задачей. Для ее решения необходимо использование мелких вычислительных сеток, обеспечивающих точное воспроизведение геометрии пучка с особенно высоким разрешением в окрестности лопаток завихрителей, при обтекании которых генерируется основная часть турбулентности, а также в пристеночных пограничных слоях на стенках стержней и окружающего их канала. Кроме того, для точного расчета сильно закрученного потока вниз по потоку от завихрителей требуется надлежащий выбор модели турбулентности.

С учетом слепого характера теста, настоящая работа включала несколько этапов.

На первом этапе был выполнен «эталонный» расчет с использованием метода моделирования крупных вихрей с пристеночным моделированием (Wall-Modeled Large Eddy Simulation - WMLES) [4]. Данный расчет проводился в предположении о том, что пучок стержней является бесконечным. Это позволяет ограничить расчетную область «ячейкой», включающей один меж-стержневой зазор, и использовать на ее границах условия периодичности, что, в свою очередь, обеспечивает значительное (примерно на порядок) сокращение вычислительных затрат по сравнению с полной постановкой задачи (пучок стержней 5×5) и делает эталонный расчет возможным с использованием доступных авторам вычислительных ресурсов.

На втором этапе аналогичные расчеты были выполнены в рамках трехмерных нестационарных уравнений Рейнольдса (Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes

Equations - URANS), замкнутых с использованием широкого спектра моделей турбулентности.

Наконец, на третьем этапе с использованием двух моделей турбулентности (SST-CC [5, 6] и ω -RSM [7]), результаты расчетов с помощью которых оказались наиболее близкими к результатам эталонного WMLES, были проведены URANS расчеты в полной геометрии MATiS-H (для пучка стержней 5×5) с двумя типами завихрителей потока.

Все расчеты, результаты которых представлены ниже, выполнены с использованием CFD-кода общего назначения ANSYS FLUENT [8].

1. Экспериментальная установка MATiS-H

Схема установки MATiS-H приведена на Рис. 1. Ее основная секция представляет собой квадратный горизонтальный канал $170 \times 170 \text{ мм}^2$, в котором расположен пучок цилиндрических стержней 5×5 . Для упрощения исследования структуры поперечного течения в меж-стержневом канале и повышения разрешающей способности метода LDA размер пучка был увеличен в 2.67 раза по сравнению с реальной сборкой топливных элементов. Этот пучок включает 25 регулярно расположенных стержней диаметром 25.4 мм с расстоянием между осями $P = 33.12 \text{ мм}$ и расстоянием от оси до стенки 18.76 мм. Соответствующий гидравлический диаметр, построенный по площади смачиваемой поверхности потока и периметру омываемых стенок (включая стенки пучка), составляет $D_H = 24.27 \text{ мм}$.

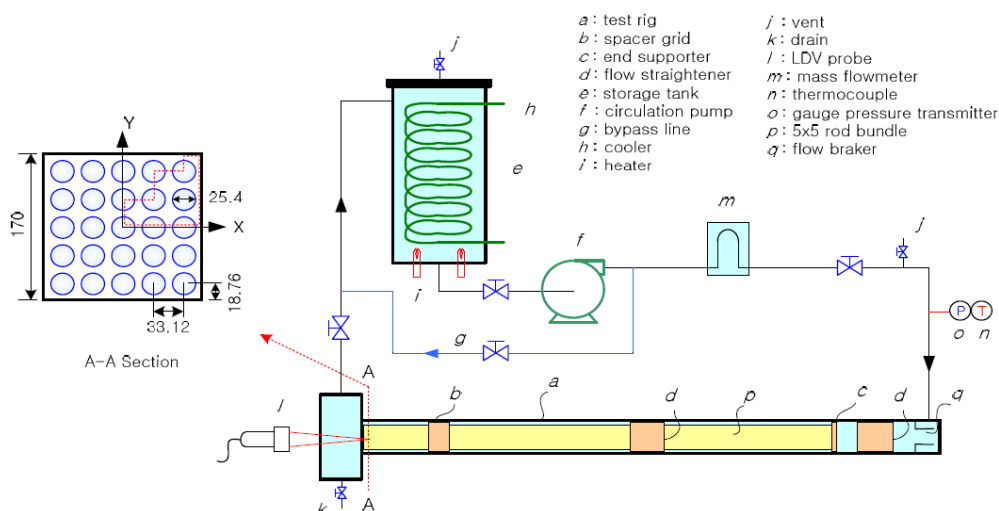


Рис. 1. Схема экспериментальной установки MATiS-H в институте KAERI [1]

В качестве рабочей жидкости во всех экспериментах MATiS-H использовалась вода при температуре 35°C и давлении 156.9 кПа. Массовый расход воды составлял 24.2 кг/с, что соответствует среднерасходной скорости 1.5 м/с и числу Рейнольдса, построенному по этой скорости и гидравлическому диаметру D_H , $Re = 50250$. Поток воды поступал в рабочую секцию установки через прерыватель, а затем проходил через два выпрямителя (d на Рис. 1), которые обеспечивали его выравнивание и ускорение формирования полностью развитых профилей скорости на входе в завихритель потока (b). Второй из этих выпрямителей установлен на расстоянии $100D_H$ вверх по течению от входного сечения завихрителя. Сравнение экспериментальных профилей скорости на расстоянии $90D_H$ вниз по течению от второго выпрямителя с результатами расчетов полностью развитого течения в пучке стержней показало, что эти профили являются полностью развитыми. Таким образом, расчетная область может быть ограничена небольшим участком пучка стержней вверх по потоку от завихрителя (b) с полностью развитым профилем на входной границе, самим завихрителем потока и участком пучка длиной чуть более $10D_H$ вниз по течению от

кончиков направляющих лопаток завихрителя, включающим сечения, в которых проводились измерения с помощью двухмерного LDA, установленного ниже по потоку от пучка стержней для измерения поперечных компонент скорости во всех меж-стержневых каналах [9, 10]. Для измерения осевой составляющей скорости положение зонда LDA изменялось соответствующим образом. В дополнительных экспериментах было установлено, что поток со 120° симметрией в отводящем резервуаре, расположенным ниже по потоку от испытательной секции, не влиял на результаты измерений в измерительном сечении A-A (Рис. 1), расположенном на расстоянии 45 мм вверх по течению от конца пучка стержней и внешнего квадратного канала.

Эксперименты проводились с двумя типами завихрителей потока типа “split” и “swirl”, обеспечивающими боковое перемешивание и/или закрутку потока, соответственно

(см. Рис. 2). Для того, чтобы проводить измерения скорости в различных сечениях, расположенных вниз по потоку от завихрителей на расстоянии $0.5D_H$, $1.0D_H$, $4.0D_H$ и $10.0D_H$ от концов лопаток, завихрители перемещались в вдоль пучка, в то время как измерительное сечение LDA оставалось неподвижным. Более подробную информацию о методике измерений и геометрии исследуемых завихрителей можно найти в описании установки MATiS-H [1]. Экспериментальные данные, приведенные ниже, были предоставлены участникам проекта после окончания его слепого этапа и передачи результатов расчетов организаторам.

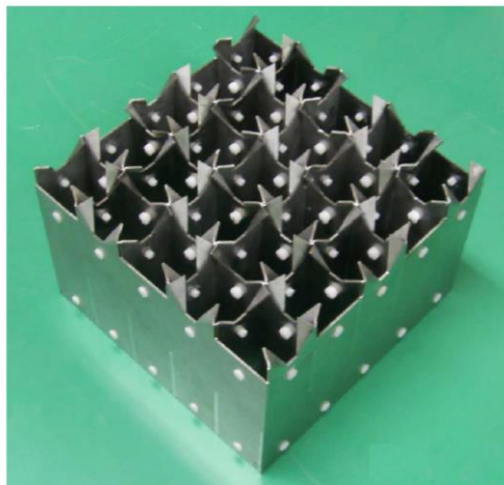


Рис. 2 Используемые в экспериментах MATiS-H завихрители типа “split” (слева) и “swirl” (справа) [1]

На Рис. 3 показаны сечения потока, расположенные на расстоянии $z = 0.5D_H$, $1.0D_H$, $4.0D_H$, и $10.0D_H$ от концов лопаток и находящиеся в этих сечениях линии y_1 , y_2 и y_3 , на которых производилось сравнение результатов расчета с экспериментом. Из-за использования концевой опоры пучка, расположенной ниже по течению, измерения поперечных (u - и v -) компонент скорости ограничены показанной на рисунке четвертью сечения, где опорная решетка была уменьшена до возможного минимума. Профили для осевой w -компоненты скорости на линиях y_1 , y_2 и y_3 доступны из соответствующих боковых измерений для всей ширины пучка.

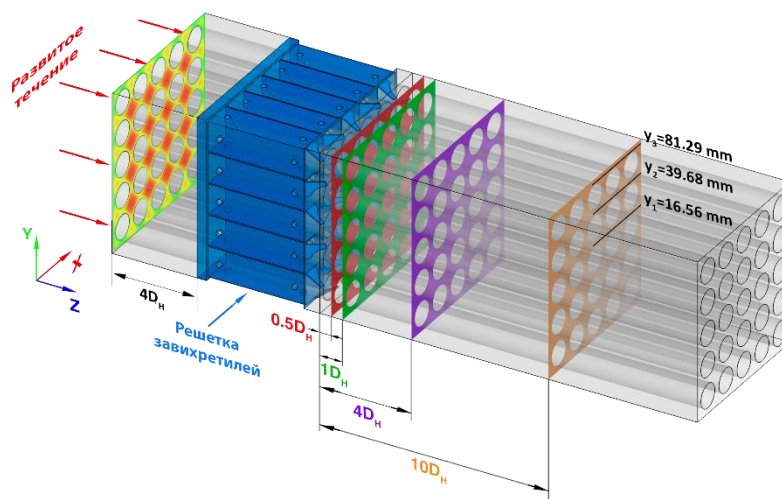


Рис. 3. Положения сечений $z = 0.5D_H$, $1.0D_H$, $4.0D_H$ и $10.0D_H$ и расположенных в них линий u_1 , u_2 и u_3 в установке MATiS-H с завихрителем типа “split”

2. Методические WMLES и URANS расчеты одной «ячейки» с завихрителем типа “split”

2.1. Постановка задачи для методических расчетов

Оригинальная геометрия MATiS-H содержит небольшие зазоры двух типов, показанные красным цветом в левой части Рис 4. К первому типу относятся зазоры между стержнями и цилиндрами малого диаметра, используемыми для фиксации распорки и стержня, а ко второму – зазоры между внешней границей завихрителя и стенками квадратного канала. С учетом того, что эти зазоры практически не влияют на поток, а для их учета требуется значительное увеличение размеров сетки и, следовательно, общих вычислительных затрат, было решено «заполнить» их твердой средой (см. правую часть на Рис. 4).

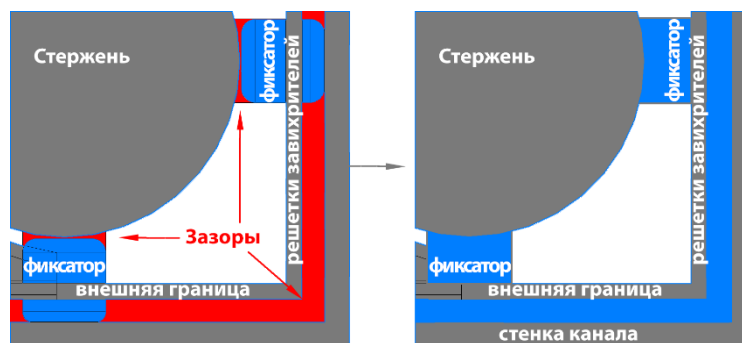


Рис. 4. Оригинальная геометрия (слева) и ее упрощенная версия (справа)

Число Рейнольдса, построенное по среднерасходной скорости и диаметру цилиндрических фиксаторов, составляет примерно 10^4 . Как известно, при таком значении Re обтекание цилиндра поперечным потоком является сильно нестационарным и сопровождается формированием вихревой дорожки Кармана. В рассматриваемом течении она может взаимодействовать с вихрями, создаваемыми лопатками завихрителя и, таким образом, существенно влиять на турбулентные структуры вниз по потоку от завихрителя, где производится сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. Исходя из этого, в данной работе не только все расчеты проводились с использованием нестационарных постановок задачи.

Даже при использовании описанного выше упрощения геометрии теста MATiS-H, она остается очень сложной, в связи с чем, проведение методических исследований для полной геометрии пучка с числом стержней 5×5 с двумя типами завихрителей потока

представляется нецелесообразным. Более того, как уже отмечалось, для проведения эталонного расчета такой геометрии с использованием WMLES доступных авторам вычислительных ресурсов было недостаточно. Поэтому было решено провести эти исследования, в частности, исследования влияния глубины сходимости итераций, необходимого разрешения сетки, используемых разностных схем, времени осреднения и модели турбулентности с использованием области, полученной в предположении о бесконечном размере пучка, то есть в одной ячейке, содержащей один межстержневой канал, с применением периодических граничных условий на ее противоположных границах (см. Рис 5).

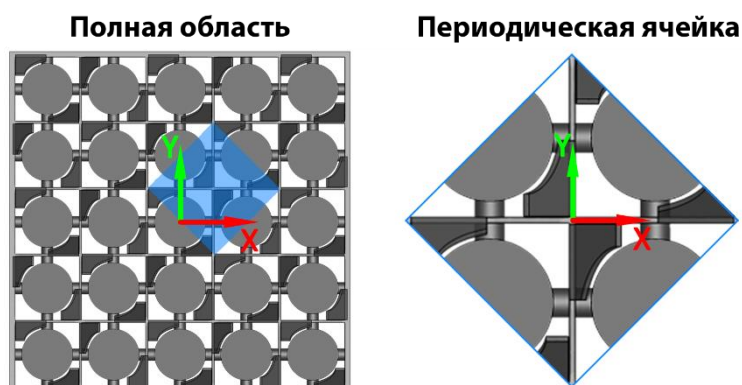


Рис. 5. Полная (слева) и периодическая (справа) расчетные области для завихрителя типа “split”

Трехмерный вид периодической расчетной области и применяемые граничные условия представлены на Рис. 6. На твердых стенках как при проведении как WMLES, так и URANS использовались условия прилипания и непроницаемости для компонент скорости. На выходной границе задан постоянный уровень статического давления, а все остальные величины экстраполируются изнутри расчетной области. Граничные условия на входе зависят от используемого подхода. При использовании URANS в качестве входных граничных условий задавались профили скорости и турбулентных характеристик, полученные из предварительных стационарных RANS расчетов полностью развитого течения со всеми рассматриваемыми моделями турбулентности. Для эталонного WMLES расчета на входной границе задавались нестационарные граничные условия, которые были получены путем суперпозиции полностью развитых профилей скорости, рассчитанных с использованием модели турбулентности SST [5] для RANS с поправкой на кривизну линий тока [6] и турбулентных пульсаций, создаваемых с помощью генератора синтетической турбулентности (Synthetic Turbulence Generator – STG) [11].

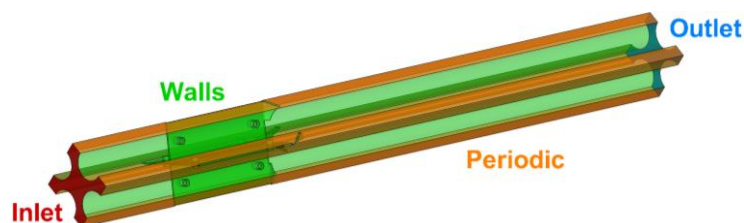


Рис. 6. Топология расчетной области и граничные условия

URANS расчеты были выполнены на серии из четырех последовательно измельченных сеток M1 - M4, содержащих $1.6 \cdot 10^6$, $2.5 \cdot 10^6$, $7.6 \cdot 10^6$ и $40 \cdot 10^6$ ячеек, соответственно. Все эти сетки сгущались в областях, где требуется повышенное пространственное разрешения течения (вихревая дорожка фон Кармана в следе фиксаторов, область интенсивных вихревых структур, отрывающихся от кончиков лопаток завихрителя, пограничные слои на твердых стенках).

Самая подробная сетка М4 удовлетворяла требованиям для WMLES. В частности, количество ячеек на толщину пограничного слоя в ней составляло не менее 10 в направлении потока и 20 в двух других направлениях [4].

Что касается разрешения нестационарных характеристик потока во времени, то основным ограничением при выборе шага интегрирования по времени для расчетов URANS является необходимость разрешения дорожки Кармана вниз по потоку от фиксаторов решетки завихрителей. Поскольку фиксаторы представляют собой цилиндры в поперечном потоке, число Струхала, построенное по их диаметру и скорости потока, должно быть близко к 0.2. Исходя из этого и считая, что для разрешения вихрей в дорожке Кармана необходимо приблизительно 40 временных шагов Δt на период, оценка Δt составляет 0.5 мс. Для расчета WMLES требование к шагу по времени вытекает из необходимости временных пульсаций наиболее мелких разрешаемых на сетке турбулентных структур. Это требование удовлетворяется при числе Куранта, построенном по величине шага сетки в направлении потока, должно быть порядка 1. Исходя из этого, шаг по времени для WMLES расчета был выбран равным 0.1 мс.

2.2. Результаты методических исследований.

Результаты URANS расчетов показали, что решения, полученные на стеках М3 и М4 близки друг к другу, то есть, что сетка М3, содержащая $7.6 \cdot 10^6$ ячеек, является достаточной для получения сеточно-независимых решений, и их сравнение при использовании различных RANS моделей дают объективное представление об их точности. Наряду с исследованием сеточной сходимости, была исследована зависимости результатов расчетов от глубины сходимости внутренних итераций на каждом временном шаге. В результате было установлено, что результаты, полученные при 5 и 10 таких итерациях, практически идентичны, то есть, что расчеты могут проводиться с 5 итерациями. Наконец еще один вычислительный параметр, влияющий на точность определения с помощью URANS и WMLES статистических характеристик потока, является промежуток времени, в течение которого производится осреднение нестационарных решений по времени. Расчеты, выполненные с различными временами осреднения, показали, что для достаточно точного определения этих характеристик время осреднения должно составлять не менее $T = 1$ с, то есть примерно 50 периодов дорожки Кармана за фиксаторами.

В следующем разделе сравниваются результаты URANS в комбинации с различными моделями турбулентности и результаты эталонного WMLES расчета, полученные в рамках соответствующих постановок задач, описанных в предыдущем разделе с использованием приведенных выше данных о вычислительных сетках и указанных значений основных вычислительных параметров.

2.3 Сопоставление результатов URANS с результатами эталонного WMLES

URANS расчеты были проведены с использованием пяти моделей турбулентности различных типов, а именно линейных моделей SST [5], SST-CC [5, 6] и k - ϵ [12], явной алгебраической модели рейнольдсовых напряжений BSL-EARSM [13] и дифференциальной модели переноса рейнольдсовых напряжений ω -RSM [7].

Сравнение осредненных по времени URANS решений с результатами эталонного WMLES расчета свидетельствует о том, что все модели позволяют качественно правильно предсказать вихревую структуру течения в непосредственной близости от решетки завихрителей (Рис. 7). Однако, далее вниз по потоку результаты расчетов с использованием различных моделей начинают значительно отличаться между собой (Рис. 8). В первую очередь, это относится к k - ϵ модели, согласно которой уже при $z=4.0D_H$ наблюдается практически полная диссипация вихревого следа завихрителей, в то время как согласно другим RANS моделям и WMLES этого не происходит. Кроме того, обращает на себя внимание сильная зависимость от модели турбулентности

скорости диссипации центрального вихря. В частности, видно, что линейные модели без поправок на кривизну линий тока (модели SST и, особенно, $k-\epsilon$), а также модель BSL-EARSM предсказывают слишком быструю диссипацию этого вихря, в то время как модель SST с поправкой на кривизну линий тока (SST-CC) предсказывает правильный (согласующийся с WMLES) темп его диссипации, но заметно завышает его размер при $z = 4.0D_H$.

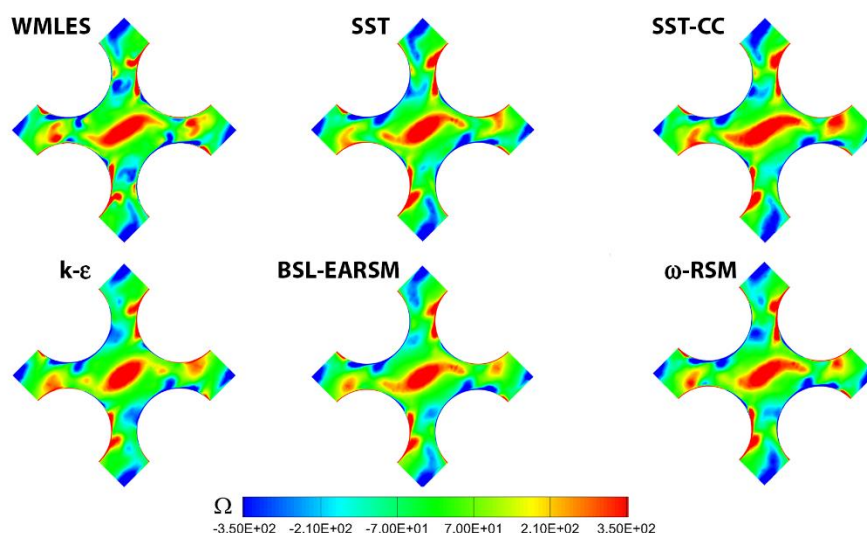


Рис.7. Контуры средней по времени z -компоненты завихренности, рассчитанные с использованием различных моделей турбулентности в сечении $z = 0.5D_H$

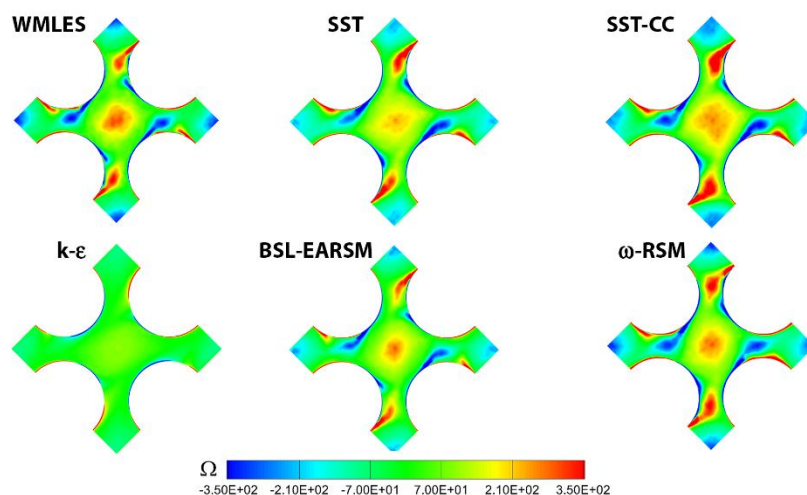


Рис.8. То же, что на Рис. 7 в сечении $z = 4.0D_H$

Превосходство моделей турбулентности SST-CC и ω -RSM над другими рассматриваемыми RANS моделями следует также из сравнения представленных на Рис. 9 распределений v -компоненты скорости в двух сечениях потока ($z = 0.5D_H$ и $z = 4.0D_H$) при $y = 0$. Следует, однако, отметить, что вычислительные затраты при использовании модели ω -RSM значительно больше, чем при использовании модели SST-CC. Таким образом, выбор между SST-CC и ω -RSM не очевиден, в связи с чем обе эти модели были использованы в дальнейших расчетах полной геометрии пучка 5×5 (см. раздел 3).

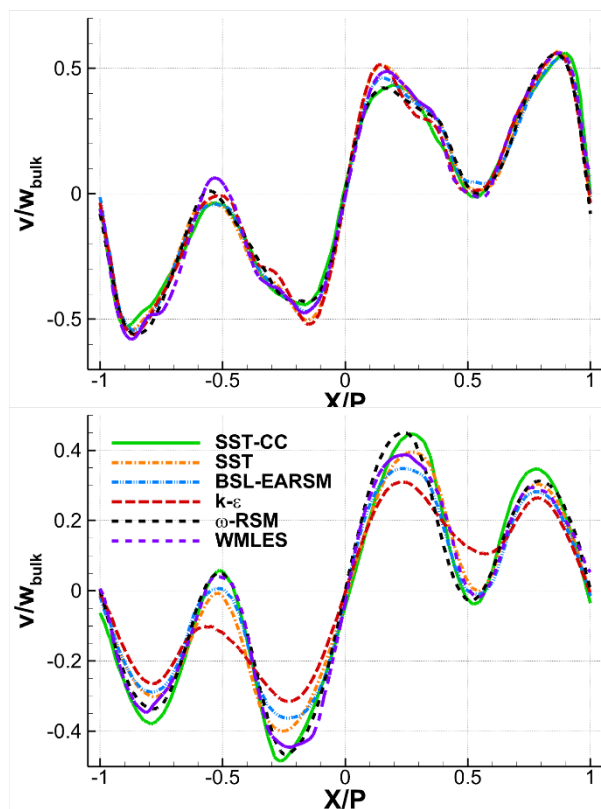


Рис. 9. Осредненные по времени распределения v -компоненты скорости, рассчитанные с использованием различных моделей турбулентности, в двух сечениях $z = 0.5D_H$ (слева) и $z = 4.0D_H$ (справа) при $y=0$

3. Обтекание полного пучка стержней 5×5

3.1. Постановка задачи

Для обоих типов завихрителей потока (“split” и “swirl”) геометрия и сетка для полного пучка 5×5 были созданы с помощью ANSYS Design Modeler и ANSYS Workbench Meshing. Расчетная область для полной геометрии с завихрителем типа “split”, начинающаяся в 100 мм выше по течению от завихрителя, показана в левой рамке Рис. 10 (развитые профили на входе в эту область были получены с помощью предварительного RANS расчета). Длина завихрителя составляет 103.1 мм без лопаток и 119.9 мм с лопатками, а длина пучка ниже по потоку составляет 400 мм ($\sim 16.5D_H$). Общая длина расчетной области составляет 620 мм. Используемая гибридная расчетная сетка (см. правую рамку на Рис. 10), содержит около 100 М ячеек (она соответствует сетке МЗ, использовавшейся в методических расчетах для одиночной периодической ячейки).

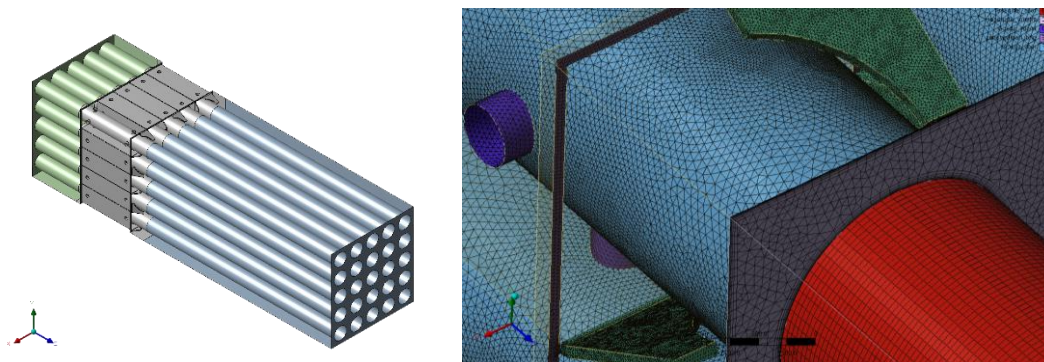


Рис. 10. Расчетная область (слева) и гибридная (с призматическими слоями на стенках) вычислительная сетка (справа) для полной конфигурации пучка с завихрителями типа “split”

Геометрия и сетка для полной конфигурации с завихрителем типа “swirl” аналогичны приведенным выше, однако, в отличие от завихрителя типа “split”, она имеет периодичность 180° в направлении y и симметрию в направлении x . Поэтому, в принципе, расчеты для этого типа завихрителя можно было бы проводить в четверти области. Однако, использование симметричной в направлении x области привело бы к подавлению дорожки Кармана вниз по потоку от фиксаторов, которые пересекаются плоскостью симметрии. Периодическая граница в направлении y также пересекает фиксаторы, однако периодические граничные условия с поворотом на 180° не препятствуют прохождению вихрей через границу. Исходя из этих соображений, было решено проводить расчеты для половины геометрии с граничными условиями периодичности с поворотом на 180° (см. Рис. 11). Полученная в результате сетка содержит около 100 М ячеек и несколько превосходит по качеству сетку для завихрителя типа “split”.

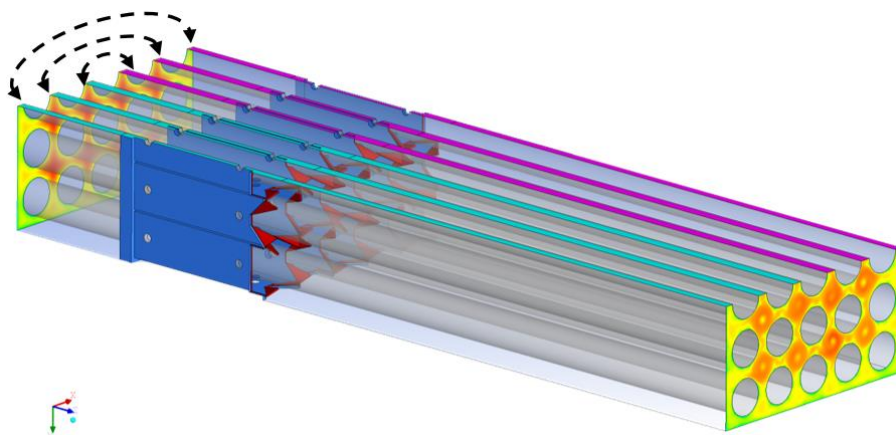


Рис. 11. Расчетная область для завихрителя типа “swirl”. Условия периодичности с поворотом на 180° на конформной сетке связывают параметры на пурпурных и голубых поверхностях

Методика расчета и вычислительные параметры, использованные при решении задачи об обтекании полного пучка MATIS-H, были такими же, как и при расчете течения в единичной ячейке (см. раздел 2.1).

3.2. Результаты расчетов полностью развитого течения

Как упоминалось выше, эти предварительные расчеты были выполнены с целью задания граничных условий на входе в расчетную область при проведении основных расчетов. Сравнение полученных в результате профилей с экспериментальными данными (см. Рис. 12) свидетельствует о том, что, хотя модель ω -RSM несколько превосходит модель SST-CC, обе модели обеспечивают вполне приемлемую точность расчета.

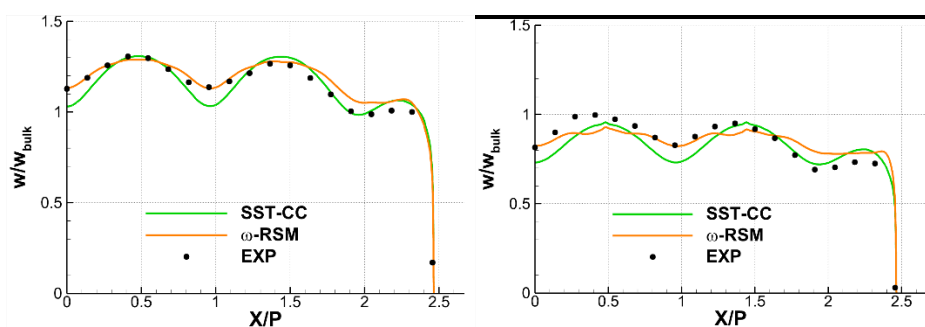


Рис. 12. Сравнение развитых профилей скорости, рассчитанных с помощью моделей турбулентности SST-CC и ω -RSM, с экспериментальными данными на линиях y_1 (слева) и y_3 (справа)

3.3. Результаты основных расчетов: структура течения и влияние типа завихрителя

На рисунке 13 в качестве примера представлено типичное мгновенное поле осевой компоненты скорости w в плоскости yz при $x = 0.047$ м (плоскость, проходящая через середину одного ряда фиксаторов) для завихрителя типа “split”. Он наглядно отражает упомянутые ранее характерные особенности данного течения. В частности, в каждом зазоре между стержнями и внутренними стенками разделительной решетки завихрителя наблюдается развитие вихревой дорожки фон Кармана. Кроме того, относительно большая зона отрицательной скорости w (голубой цвет), наблюдаемая у нижней лопатки с правой стороны от завихрителя, соответствует зоне рециркуляции между этой лопаткой и стенкой канала. Наконец, из анализа анимаций нестационарных полей потока отчетливо видно, что в области, расположенной вниз по потоку от решетки завихрителей, течение является сильно нестационарным.

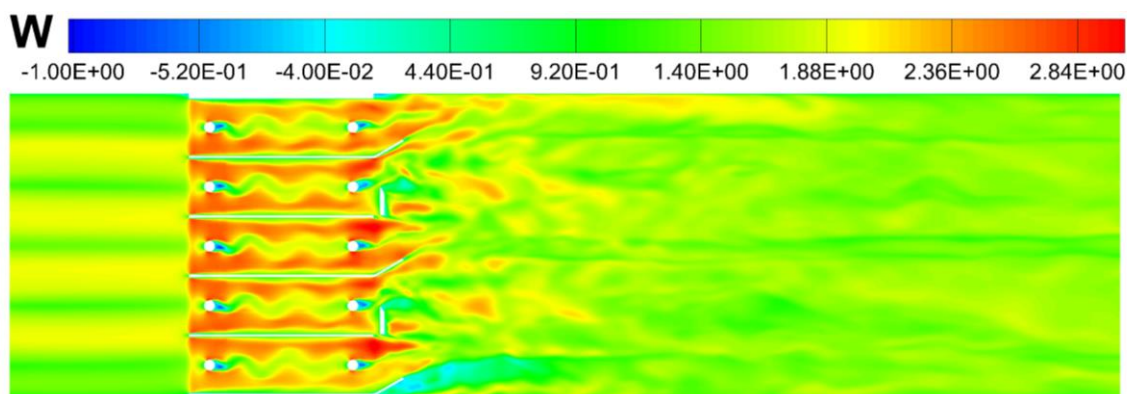


Рис.13. Мгновенное поле продольной составляющей скорости w в сечении yz при $x=0.014$ м, из расчета с использованием модели SST-CC для завихрителя типа “split”

Визуализация линий тока для обоих типов завихрителей, представленная на Рис. 14, свидетельствует о том, что использование завихрителя типа “split” приводит к перераспределению и перемешиванию потоков между соседними меж-стержневыми каналами, в то время как завихритель типа “swirl” генерирует один доминирующий вихрь в каждом канале.

Кроме того, лопатки завихрителей создают сложную картину интенсивных вихрей, которые можно визуализировать и с помощью полей осредненной по времени z -компоненты завихренности Ω_z , показанных на Рис. 15. Из него видно, что сразу за решеткой завихрителей типа “split” ($z = 0.5D_H$) наблюдается сложная картина вращающихся в противоположные стороны вихрей с высокой интенсивностью (Рис. 15а). При $z = 4.0D_H$ и далее вниз по потоку эти вихри изменяются по форме с вытянутой на почти круглую (Рис. 15с). В целом, форма этих вихрей качественно аналогична форме вихрей, формирующихся в изолированном канале (см. Рис. 7), что свидетельствует о репрезентативности упрощенной постановки задачи. Для завихрителя типа “swirl” вихри расположены в центрах каналов (Рис. 15b). Наконец, сравнение полей с различными типами завихрителя при $z = 4.0D_H$ (Рис. 15с и d) свидетельствует о более быстрой диссипации вихрей, генерируемых завихрителем типа “swirl”.

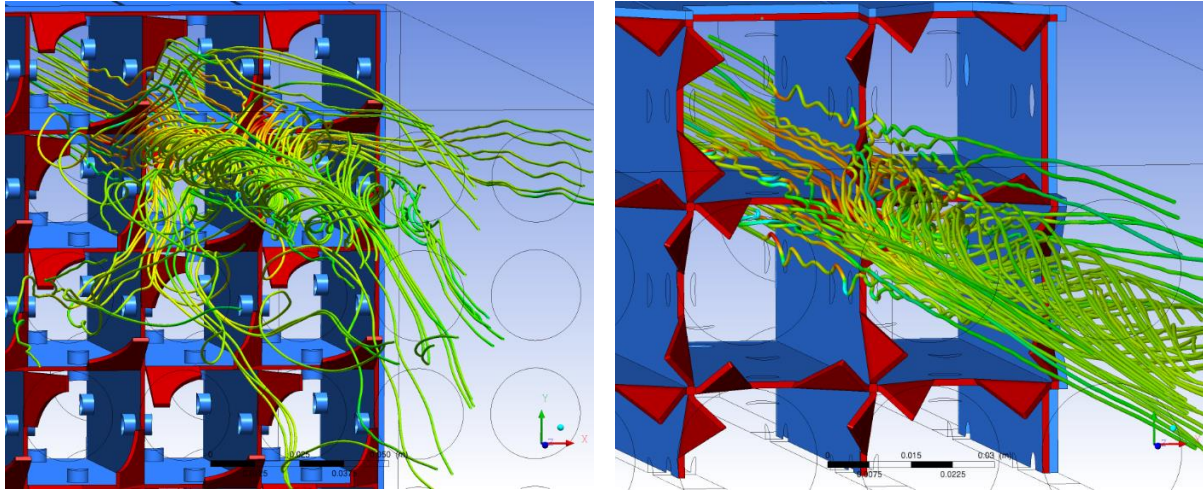


Рис. 14. Линии тока в пучке стержней с завихрителями типа “split” (слева) и “swirl” (справа), полученные с использованием модели SST-CC

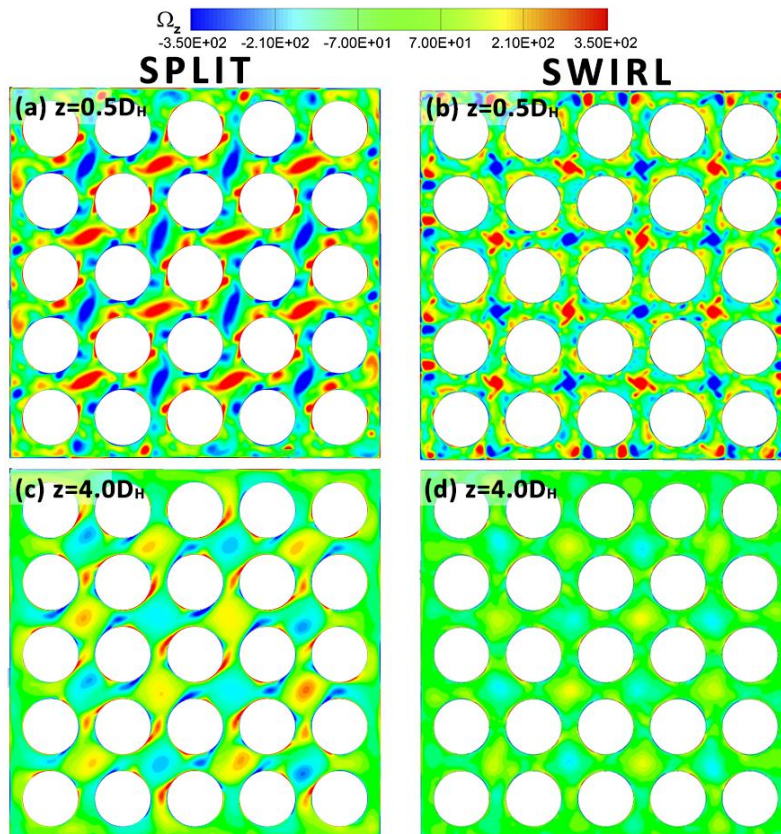


Рис. 15. Поля осредненной по времени z -компоненты завихренности в плоскости xy при $z = 0.5D_H$ и $4.0D_H$ вниз по потоку от завихрителей типа “split” (слева) и “swirl” (справа), полученные с использованием модели SST-CC

3.4. Сравнение с экспериментальными данными

На рисунках 16, 17 представлено сравнение расчетных профилей осредненных по времени компонент вектора скорости с экспериментальными данными KAERI, полученными на установке MATiS для решетки завихрителей типа “split” вдоль линии y_2 (см. Рис. 3 выше) в сечениях $z = 0.5D_H$ и $z = 4.0D_H$. Из них видно, что, хотя обе рассматриваемые модели обеспечивают близкие решения, некоторые количественные различия между ними все же существуют. Например, экстремумы скорости, предсказанные моделью SST-CC, несколько отличаются от соответствующих экстремумов, предсказанных моделью ω -RSM. То же относится к x -координатам этих

экстремумов, предсказанных двумя моделями. Эти различия можно объяснить линейным характером модели SST-CC, что приводит к отсутствию поперечных вторичных токов, вызванных анизотропией напряжений Рейнольдса. Модель ω -RSM способна описать это явление, которое приводит к перераспределению импульса в поперечном направлении и, как следствие, к изменению осевых распределений скорости.

Что касается согласия результатов URANS расчетов с экспериментальными данными, то из рисунков видно, что, количественное согласие прогнозируемых распределений продольной компоненты скорости (Рис. 16) несколько хуже, чем поперечных компонент (Рис. 17). Тем не менее, в целом согласие расчета с экспериментом можно считать вполне приемлемым. Отметим также, что отклонения от эксперимента результатов расчетов, полученных с использованием линейной модели SST-CC и дифференциальной модели Рейнольдсовых напряжений ω -RSM, близки между собой. Это свидетельствует о том, что эти отклонения, скорее всего, вызваны известными общими ограничениями применимости подхода URANS, а не специфическими недостатками этих двух моделей.

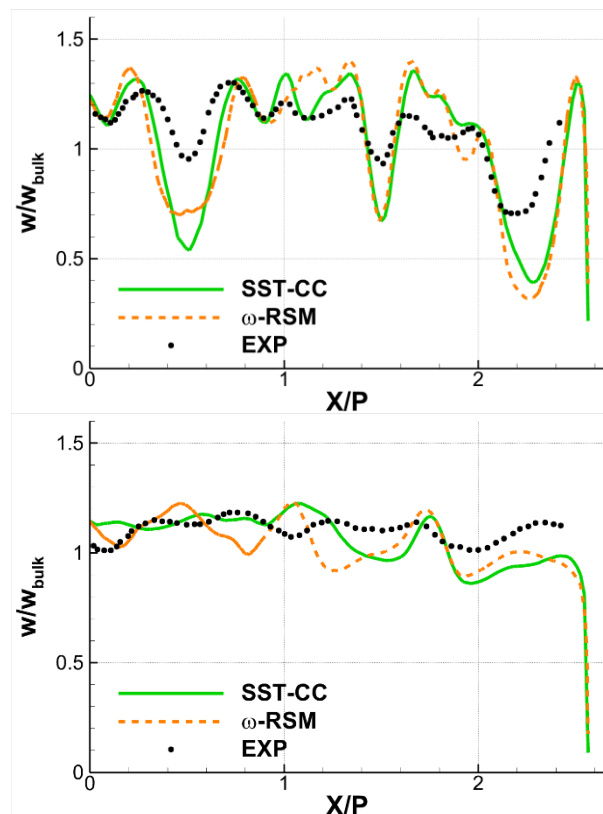


Рис. 16. Сравнение осредненной по времени осевой компоненты скорости w на линии y_1 для сечений $z = 0.5D_H$ и $4.0D_H$ для завихрителя типа “split”

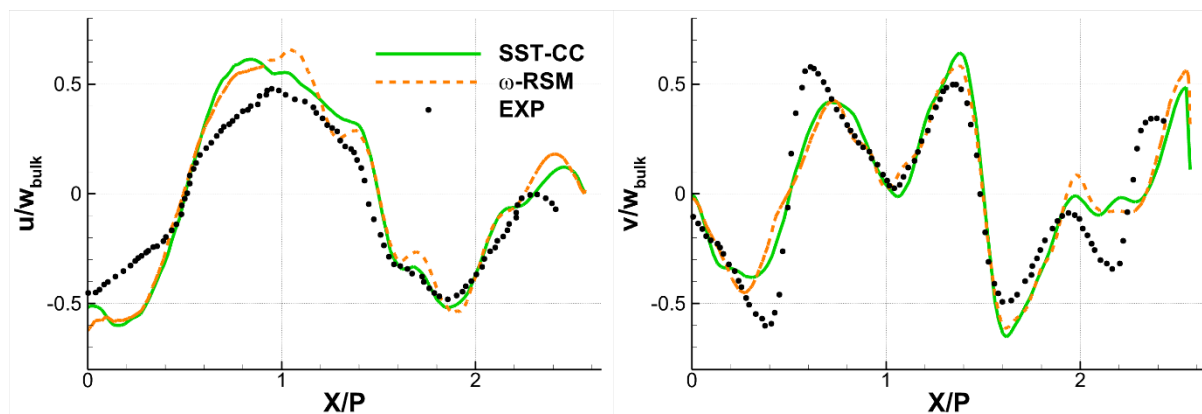


Рис. 17. То же, что на рис. 16 для поперечных компонент скорости u и v

Заключение

Для условий тестового эксперимента OECD/NEA MATiS-H [1] с помощью пакета ANSYS Fluent выполнены расчеты продольного обтекания изотермическим однофазным турбулентным потоком пучка цилиндрических стержней 5×5 с решетками завихрителей потока. Показано, что данное течение является существенно нестационарным, в связи с чем для его моделирования необходимо использовать нестационарные подходы (URANS, WMLES, LES и т. п.).

Сравнение результатов WMLES и URANS расчетов течения в изолированном периодическом меж-стержневом канале с завихрителем типа “split” позволило выбрать наиболее подходящие для рассматриваемого типа течений RANS модели турбулентности (линейную модель SST с поправкой на кривизну линий тока SST-CC и модель переноса рейнольдсовых напряжений ω -RSM), а также определить необходимое сеточное разрешение и выбрать оптимальные численные параметры для проведения основных (в рамках полной постановки задачи для пучка стержней 5×5) URANS расчетов. Результаты этих расчетов показали, что URANS подход в сочетании с выбранными моделями турбулентности обеспечивает вполне приемлемую точность определения основных характеристик рассматриваемого течения.

Список литературы

- OECD/NEA: MATiS-H - Final Benchmark Specifications, OECD/NEA & KAERI, 2011.
- Chang, S.K., Moon, S.K., Baek, W.P., Choi, Y.D. Phenomenological investigations on the turbulent flow structures in a rod bundle array with mixing devices // Nuclear Engineering and Design, 2008, Vol. 238, pp. 600-609.
1. CFD analysis of the MATiS-H experiments on the turbulent flow structures in a 5×5 rod bundle with mixing devices / Kang, H. S., Chang, S. K. and Song, C.-H. // Proceedings of CFD4NRS-3, Conference on Experimental Validation of CFD and CMFD Codes to Nuclear Reactor Safety Issues. Washington, DC, USA, 14-16 September 2010.
 2. Shur, M.L., Spalart, P.R., Strelets, M.Kh., Travin, A.K. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities // International Journal of Heat and Fluid Flow 2008, v. 29, pp. 1638–1649
 3. Ten Years of Experience with the SST Turbulence Model / Menter, F.R., Kuntz, M., Langtry, R. // Proceedings of 4th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2003, pp. 625–632.
 4. Smirnov, P.E., Menter, F.R. Sensitization of the SST Turbulence Model to Rotation and Curvature by Applying the Spalart–Shur Correction Term // Journal of Turbomachinery, Vol. 131(4), 2009.
 5. Wilcox, D.C. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc. La Canada, California, 1998.
 6. ANSYS Fluent Manual: Release 16.0. ANSYS Inc., Canonsburg, 2016

7. OECD/NEA-MATiS-H Rod Bundle CFD Benchmark Exercise Test / Chang, S.K., Kim, S. and Song, C.H. // Proceedings of CFD4NRS-4, Conference on Experimental Validation and Application of CFD and CMFD Codes in Nuclear Reactor Technology, OECD/NEA and IAEA Workshop, Daejeon, South Korea, 10-12 September, 2012.
 8. OECD/NEA-KAERI Rod Bundle CFD Benchmark Exercise on Turbulent Mixing in a Rod Bundle with Spacers (MATiS-H) - Status Report on Experiments / Song, C.H., Lee, J. R. // Proceedings of Open Meeting for CFD Benchmark Exercise, OECD/NEA Headquarter, Paris, France, 30 May 2012.
 9. *Shur, M.L., Spalart, P.R., Strelets, M. Kh., Travin, A.K.* Synthetic Turbulence Generator for RANS-LES Interfaces in Zonal Simulations of Aerodynamic and Aeroacoustic Problems // Flow Turbulence and Combustion, 2014, v. 93(1), pp. 63-92.
 10. *Launder, B.E., Spalding, D. B.* Lectures in Mathematical Models of Turbulence. Academic Press, London, England. 1972.
- Explicit Algebraic Reynolds Stress Models for Anisotropic Wall-Bounded Flows / Menter, F.R., Garbaruk, A.V., Egorov, Y. // Proceedings of EUCASS – 3rd European Conference for Aero-Space Sciences, Versailles, France, 2009.