

## РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ ВДОЛЬ ПУЧКА ЦИЛИНДРОВ ПРИ НАЛИЧИИ ЛОКАЛЬНЫХ ЗАВИХРИТЕЛЕЙ ПОТОКА

### АННОТАЦИЯ

Исследовано течение вдоль пучка цилиндров при наличии локальных завихрителей потока с использованием нестационарных уравнений Рейнольдса (Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes, URANS) и различных полуэмпирических моделей турбулентности в рамках программного пакета ANSYS FLUENT. Показано, что как дифференциальная ( $\omega$ -RSM), так и алгебраическая (WJ-BSL-EARSM) модели рейнольдсовых напряжений не имеют преимуществ при расчете данного течения перед SST моделью с поправкой на кривизну линий тока (SST-CC). Высокая точность расчета SST-CC URANS подтверждается хорошим согласием с результатами, полученными с использованием метода крупных вихрей с пристеночным RANS моделированием (WMLES) и с экспериментальными данными.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В мировой практике проектирования и производства тепловыделяющих сборок (ТВС) для АЭС с водо-водяными ядерными реакторами, с целью выравнивания температуры оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) и увеличения запасов кризиса кипения, в качестве интенсификаторов теплообмена используются дистанцирующие и перемешивающие решетки с завихрителями потока. В последние годы при их проектировании все чаще используются результаты численного моделирования. Следует отметить, что точное предсказание полей скорости и, как следствие, конвективного теплообмена при нестационарном течении сквозь такие решетки является достаточно сложной задачей. В первую очередь, требуются достаточно подробные сетки, разрешающие особенности течения в окрестности завихрителей, где поток существенно закручивается, турбулизируется и зарождаются интенсивные вихри. Большое количество завихрителей приводит к тому, что расчет такого течения при помощи вихре-разрешающих подходов (даже наиболее экономичных), обеспечивающих высокую точность решения, требует огромных вычислительных ресурсов и практически невозможен. Поэтому в инженерной практике подобные задачи обычно решаются с использованием гораздо более экономичных стационарных или нестационарных уравнений Рейнольдса, которые не всегда способны предсказать характеристики течения, в первую очередь, по причине несовершенства замыкающих моделей турбулентности.

Целью данной работы являлось исследование возможностей различных моделей турбулентности в рамках пакета ANSYS FLUENT для описания течения вдоль пучка цилиндров с решеткой завихрителей потока, которое экспериментально исследовалось в [1].

### 2. ОПИСАНИЕ ЗАДАЧИ

Рабочая часть экспериментальной установки состояла из решетки 5x5 цилиндров диаметром 25.4 мм и длиной около 4 м каждый, расположенных в канале квадратного сечения (Рис. 1а). Среднерасходная скорость течения воды в канале составляла  $U_b = 1.5$  м/с, а температура около 35°C, что обеспечивало число Рейнольдса  $Re = U_b \cdot D_H / \nu = 50250$ , где  $D_H = 25.4$  мм - гидравлический диаметр. На расстоянии примерно 2.5 м вниз по потоку от входного сечения располагалась решетка завихрителей, которая

крепилась к каскаду стержней при помощи втулок (Рис. 1б). Поскольку длина участка до завихрителей составляла примерно 100 гидравлических диаметров  $D_H$ , то перед решеткой обеспечивалось развитое течение.

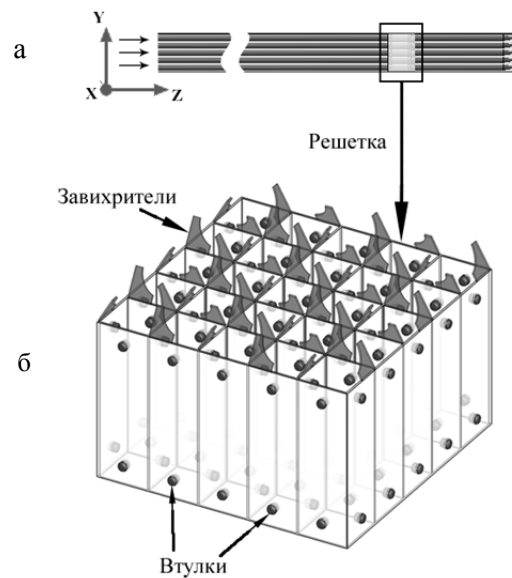


Рис. 1. Рабочая часть экспериментальной установки (а) и решетка завихрителей потока (б).

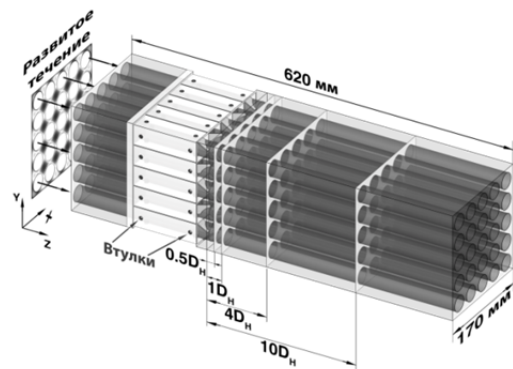


Рис. 2. Расчетная область

Поскольку основной интерес представляло течение за решеткой завихрителей, расчетная область для CFD расчета (Рис. 2), включала в себя саму решетку и экспериментальные сечения, расположенные на расстояниях  $0.5D_H$ ,  $1D_H$ ,  $4D_H$  и  $10D_H$  вниз по потоку от завихрителей. Существенная нестационарность рассматриваемого течения (в первую очередь, благодаря наличию дорожек Кармана в следе

за втулками) не позволяла получить сошедшее решение в стационарной постановке, поэтому для решения данной задачи использовались нестационарные уравнения Рейнольдса (Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes, URANS).

### 3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Для определения таких параметров расчета, как шаг по времени, время осреднения для получения статистически установившегося среднего решения, а также для выбора достаточной расчетной сетки и оптимальной модели турбулентности, была проведена серия методических расчетов. Поскольку расчетная область в поперечном сечении имела периодическую структуру (за исключением окрестности стенки канала), в целях сокращения вычислительных ресурсов эти исследования проводились в периодической области (суб-канале), размер которой в 12.5 раз меньше полной области (Рис. 3).

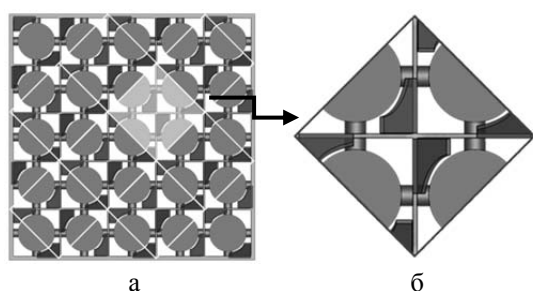


Рис. 3. Поперечное сечение решетки завихрителей в полной области (а) и в суб-канале (б)

На входной границе такой области задавались профили скорости и турбулентных характеристик, полученные в ходе предварительного расчета развитого течения, а давление экстраполировалось из расчетной области. На выходной границе задавался равномерный профиль давления, а остальные переменные экстраполировались; на твердых стенках использовались автоматические пристенные функции [2].

Для моделирования турбулентности использовались три полуэмпирические модели. Первая из них - хорошо зарекомендовавшая себя на широком классе задач  $k-\omega$  SST модель Ментера [2], дополненная поправкой на кривизну линий тока (SST-CC) [3]. Кроме того, были рассмотрены две модели Рейнольдсовых напряжений, потенциально имеющие преимущество перед моделями турбулентной вязкости: дифференциальная модель ( $\omega$ -RSM) [4] и явная алгебраическая модель (WJ-BSL-EARSM) [5].

#### 3.1 Исследование влияния численных параметров и выбор расчетной сетки

Исследования проводились с использованием SST-CC модели турбулентности. Они показали, что шаг по времени  $\Delta t = 0.5$  мс являлся достаточным, поскольку при дальнейшем его измельчении решение не менялось. Следует отметить, что этот шаг примерно в 40 раз меньше периода схода вихрей Кармана с втулок. Исследования также показали, что время осреднения, достаточное для получения статистически установившегося решения, составляло 1 с (около 50 периодов схода вихрей Кармана).

Сложность решетки завихрителей привела к необходимости построения неструктурированных сеток с разным типом ячеек: призматическими, тетраэдрными и гексагональными. Для исследования сеточной сходимости были построены четыре различные сетки: T1-T4 (Таблица 1). Следует отметить, что наиболее мелкая сетка T4 удовлетворяла требованиям, предъявляемым к сеткам для метода моделирования крупных вихрей с пристеночным RANS моделированием (Wall Modelling Large Eddy Simulation, WMLES) [6], в частности, отношение продольного и поперечного шага сетки к толщине пограничного слоя составляло 0.1 и 0.05 соответственно. Проведенные расчеты показали, что сетка T3 является достаточной для получения сошедшего по сетке решения, и она использовалась при проведении дальнейших расчетов для оценки моделей турбулентности.

Таблица 1. Расчетные сетки и их параметры

	T1	T2	T3	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

#### 3.2 Влияние модели турбулентности

Экспериментальные профили [1] были получены во всей 5x5 решетке завихрителей, при наличии влияния боковых стенок канала, поэтому их использование для оценки результатов в периодической постановке могло привести к неверным выводам. Для оценки качества моделей турбулентности был проведен расчет с использованием алгебраического WMLES подхода [6], который более достоверно описывает характер течения, но требует гораздо больших вычислительных затрат. Расчет проводился на сетке T4, которая, как уже было сказано, была построена с учетом требований к сеткам для WMLES расчета, а шаг по времени выбирался так, чтобы число Куранта не превышало 1, и составил 0.1 мс.

Результаты расчетов показали, что все рассмотренные в рамках URANS подхода модели турбулентности обеспечивали похожие решения, хорошо совпадающие с решением, полученным с использованием WMLES метода. В частности, из развития осредненных по времени полей завихренности (Рис. 4) видно хорошее согласие как крупных вихревых структур в центре суб-канала, так и сравнительно небольших вихрей в окрестности стенок цилиндров. Количественное сравнение профилей скорости вдоль линии симметрии в различных сечениях (Рис. 5) также показало хорошее согласие результатов URANS и WMLES.

Таким образом, все рассмотренные полуэмпирические модели турбулентности для замыкания уравнений Рейнольдса обеспечивают примерно одинаковую, достаточно высокую точность решения задач данного типа.

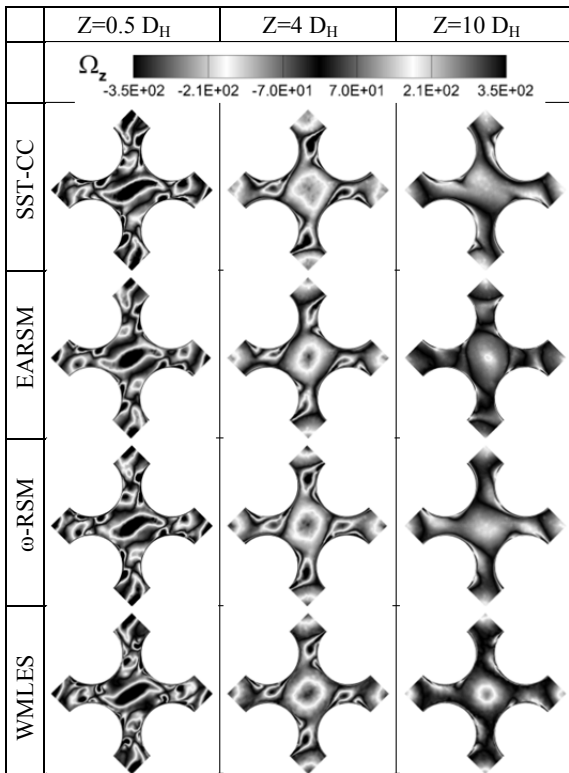


Рис. 4. Развитие контуров завихренности вниз по потоку после решетки завихрителей

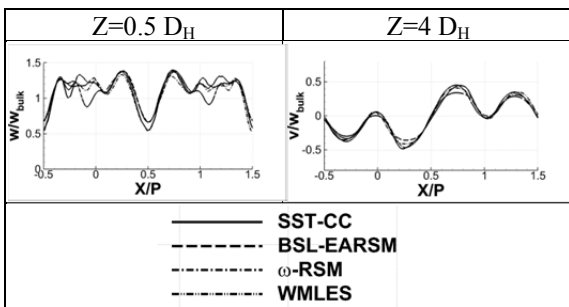


Рис. 5. Профили осредненных компонент скорости для различных моделей турбулентности непосредственно после решетки завихрителей ( $P = 33.12$  мм - межцилиндровый зазор)

#### 4. ОСНОВНОЙ РАСЧЕТ

Основной расчет течения вдоль пучка труб был проведен с использованием опыта, полученного при проведении методических расчетов. В частности, расчет проводился на аналоге сетки T3 для полной области (около 100 М ячеек) с вычислительными параметрами, выбранными в ходе предварительного расчета. Для замыкания нестационарных уравнений Рейнольдса была использована модель SST-CC, поскольку, как было показано, она не уступает моделям рейнольдсовых напряжений в точности расчета подобных течений и существенно превосходит их в простоте и вычислительной эффективности.

##### 4.1 Структура течения

Рассматриваемое течение имело сложную вихревую структуру. На мгновенном распределении продольной компоненты скорости (Рис. 6) в центре расчетной области ( $x = 14$  мм) и вблизи внешней стенки канала ( $x = 80$  мм) видны вихревые структуры дорожек Кармана, возникающих за втулками. Вниз по потоку, за рядом завихрителей, наблюдались много-

численные зоны отрыва, наиболее интенсивные из которых расположены в окрестности внешней стенки.

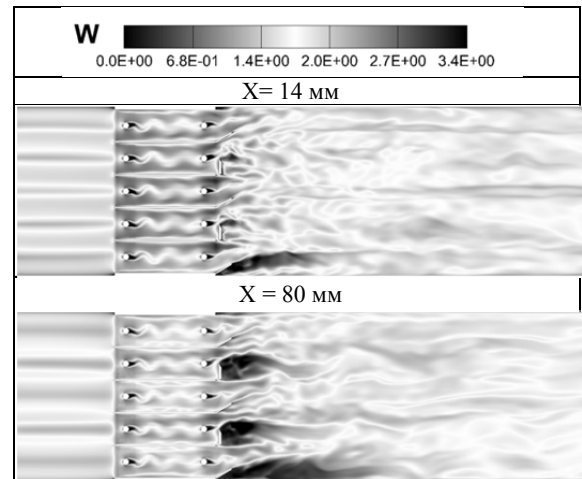


Рис. 6. Картина течения в различных сечениях

Вихревые структуры, порожденные решеткой завихрителей в каждом суб-канале из 4 цилиндров, состояли из одного основного и двух дополнительных вихрей, расположенных между цилиндрами (Рис. 7а). Вниз по потоку эти вихри деформировались, взаимодействовали друг с другом (Рис. 7б) и постепенно вырождались (Рис. 7в).

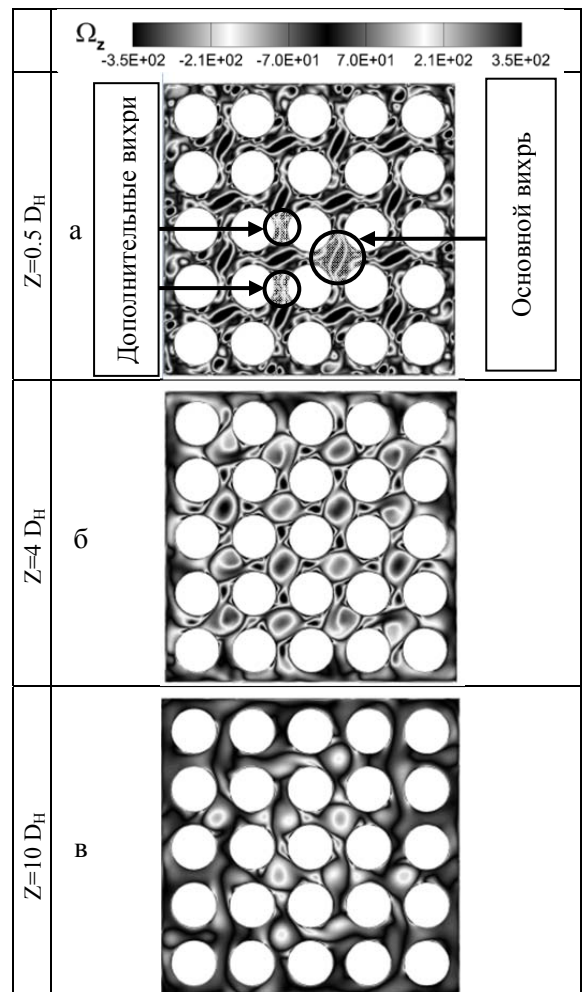


Рис. 7. Контур завихренности в различных сечениях за решеткой завихрителей потока

## 4.2 Сравнение с экспериментом

Профили продольной и поперечной компоненты скорости (Рис. 8) непосредственно вблизи завихрителей ( $Z=0.5D_H$ ) показывают качественное согласование расчета и эксперимента, однако интенсивность вихревых структур в расчете несколько завышена. Возможной причиной может быть неспособность URANS подхода предсказать свойства сильно закрученного течения вблизи завихрителей. Это подтверждается тем, что вниз по потоку ( $Z=4D_H$ ) согласие расчета и эксперимента улучшается.

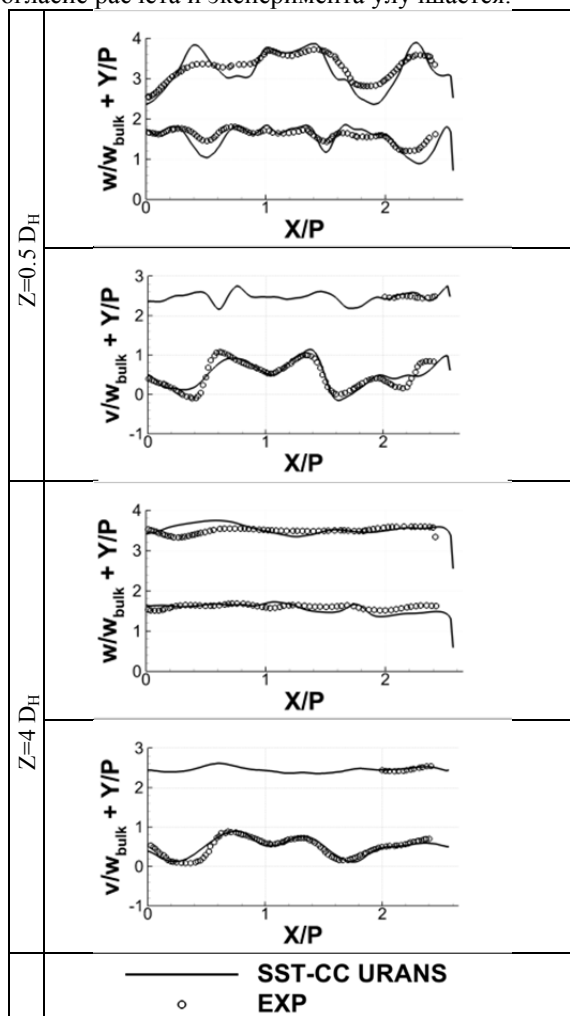


Рис. 8. Профили продольной и поперечной компонент скорости на выходе из решетки завихрителей ( $Z=0.5D_H$ ) и на удалении от нее вниз по потоку ( $Z=4D_H$ )

## SUMMARY

*A.A.Matyushenko, A.V.Garbaruk*

Saint-Petersburg State Politechnical University  
Russia, Saint-Petersburg, 195251, Politechnicheskaya, 29

## COMPUTATIONS OF THE FLOW THROUGH A 5X5 ROD BUNDLE WITH SPACER GRID

Flow through a 5x5 rod bundle with split spacer grid was investigated using Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations (URANS) closed with different turbulence models using ANSYS FLUENT. It is shown that both differential ( $\omega$ -RSM) and algebraic (WJ-BSL-EARSM) Reynolds stress models do not exceed eddy-viscosity  $k$ - $\omega$  SST model with curvature correction (SST-CC). High accuracy of SST-CC URANS is proved by a good agreement of the solution with Wall Modelling Large Eddy Simulation (WMLES) results and experimental data.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Турбулентное течение воды в каскаде стержней с локальными завихрителями потока было исследовано с использованием программного пакета ANSYS FLUENT. Расчеты, проводившиеся с использованием нестационарных уравнений Рейнольдса, показали сложную структуру интенсивных вихрей, которые вырождались по мере удаления от решетки завихрителей.

Сравнение с экспериментальными данными свидетельствует о высокой SST-CC URANS во всей области за исключением непосредственной окрестности выхода из решетки завихрителей потока.

### Список литературы

1. OECD/NEA. 2011.MATiS-H Benchmark - Final Benchmark Specifications, pp. 44. 2011.
2. Menter, F. R., Kuntz, M., & Langtry, R. (n.d.). Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. 2003
3. 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
4. D. C.Wilcox. Turbulence Modeling for CFD. DCW Industries, Inc. La Canada, California. 1998.
5. Menter, F. R., Garbaruk, A. V., & Egorov, Y. Explicit Algebraic Reynolds Stress Models for Anisotropic Wall-Bounded Flows. 2009
6. 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. 2008