

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИНХРОННОГО И АСИНХРОННОГО ТУРБУЛЯТОРОВ
В ANSYS FLUENT**

*аспирант Н. К. ВОЛОСОВА
(Московский государственный технический университет
им. Н. Э. Баумана, Россия);
д-р физ.-мат. наук, проф. К. А. ВОЛОСОВ,
канд. физ.-мат. наук А. К. ВОЛОСОВА
(МИИТ, Россия);
канд. физ.-мат. наук, доц. Д. Ф. ПАСТУХОВ,
канд. физ.-мат. наук, доц. Ю. Ф. ПАСТУХОВ
(Полоцкий государственный университет, Беларусь)*

Аннотация. В оболочке ANSYS Fluent построена модель синхронного и асинхронного турбуляторов из четырех сферических прерывателей в круглой трубе. Диаметры цилиндрического канала и сферы прерывателя подобраны так, что прерыватели не закрывают полностью канал трубы во все моменты времени. Но допускают плавное падение давления в несколько атмосфер на участке в 1,5 м. В асинхронном турбуляторе траектория и время перемешивания частиц жидкости больше, чем в синхронном турбуляторе. Турбулентные характеристики перемешанной жидкости однороднее в асинхронном турбуляторе, использована 2 k-ε модель гидродинамики.

Ключевые слова: ANSYS Fluent, гидродинамика, численные методы.

Введение. В гидродинамике, аэродинамике, в механике сплошных сред с применением новых сверхпрочных материалов известно несколько технических устройств, преобразующих ламинарное течение среды в турбулентное. В самолетостроении на передней кромке профиля крыла укрепляют плоские пластины-турбулизаторы, которые смещают точку отрыва пограничного слоя вверх по профилю крыла, тем самым увеличивая подъемную силу и аэродинамические свойства крыла. В технике применяют турбуляторы, преобразующие ламинарное течение среды в турбулентное течение внутри данного устройства. Например, в химии турбуляторы активно перемешивают реагенты, в теплотехнике отрывают пограничный ламинарный слой у стенки, увеличивая теплоотдачу через стенки устройства.

В работе [1] рассмотрен один сферический прерыватель в цилиндрической трубе и резким скачком давления до 7-8 атмосфер в малой области прерывателя диаметром 1 дм. В данной работе нами предложены две модели – устройства:

синхронный и асинхронный турбуляторы, состоящие из четырех сферических прерывателя (радиусом $R_2 = 0,12$ м) для потока жидкости, проходящей вдоль цилиндрической трубы длиной 3 м радиусом $R_1 = 0,1$ м .

В отличие от работы [1] наши модели допускают плавное падение давления в несколько атмосфер на участке 1.5 м. На рис. 1 показана геометрия нестационарной(transient) модели, построенной в оболочке Ansys Fluent.

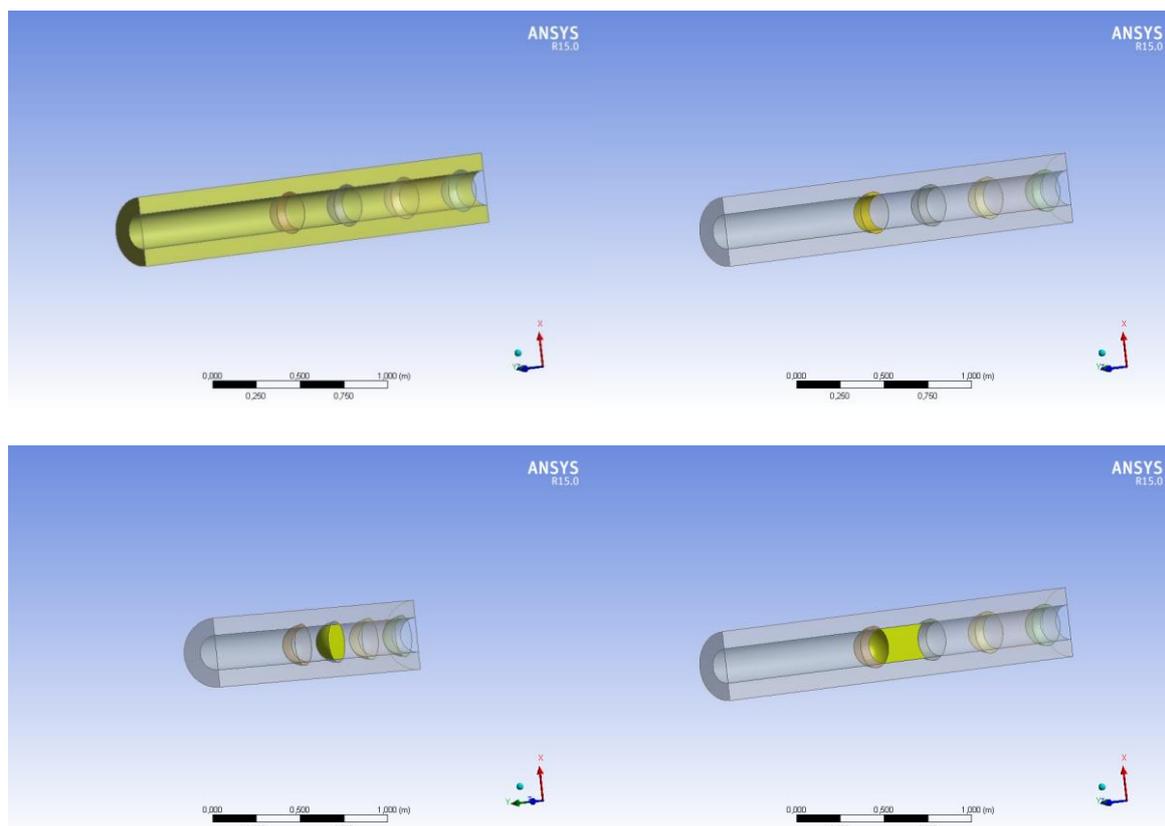


Рисунок 1. – Геометрия модели

Первые две части рисунка – труба (ostov) и сферические прерыватели(sphere), выполнены из алюминия. Остальные части модели рис. 1 – промежуточные части трубы (middle) и вращающиеся части (rotor) заполнены водой. Чтобы уменьшить давление на вращательные оси сферических прерывателей жидкости мы выбрали четыре прерывателя. Идея модели заключается в том, чтобы плавно распределить давление вдоль оси трубы. Для этого две круглых лопатки каждой из 4 турбин должны более чем на половину перекрыть зазор внутренней трубы. Можно посчитать из приведенных данных, что радиус лопатки и радиальная степень перекрытия отверстия трубы равны

$$r = R_2 \sin \left(\arccos \left(1 - \frac{R_2 - R_1}{R_2} \right) \right) = R_2 \sqrt{1 - (R_1 / R_2)^2},$$

$$k = \frac{r}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} \sqrt{1 - (R_1 / R_2)^2} = \frac{0,12}{0,1} \sqrt{1 - \frac{0,1^2}{0,12^2}} = 0,663$$

С одной стороны, степень перекрытия трубы лопатками далеко от 100%, что исключает скачки давления на ось одного прерывателя (износ прерывателя) в любой момент времени. С другой стороны, благодаря большой угловой скорости вращения прерывателей ($\omega = 157,096 = 50\pi$ рад/с) и большой степени радиального перекрытия лопаток можно плавно осуществить перепад давления в несколько атмосфер на системе 4 прерывателей на отрезке 1,5 м (расстояние между прерывателями 0,5 м). На входе модели(inlet)давление больше на 2 атмосферы (200000 Па) давления, чем на ее выходе(outlet).

На рис. 2 построена сетка нашей модели на этапе meshing с максимальным диаметром ячейки 1 см. Построитель сетки последовательно находит оптимальную сетку для каждой из 14 частей модели с учетом материала каждой из них (solid, liquid). В модели задавали согласованное вращение прерывателей с равным углом поворота φ в любой момент времени (синхронный турбулятор) или (асинхронный турбулятор), в котором прерыватели сдвинуты на угол $\Delta\varphi = (\varphi_{i_j})(-1)^{i_k - i_j}$, где i_k, i_j – номера прерывателей.

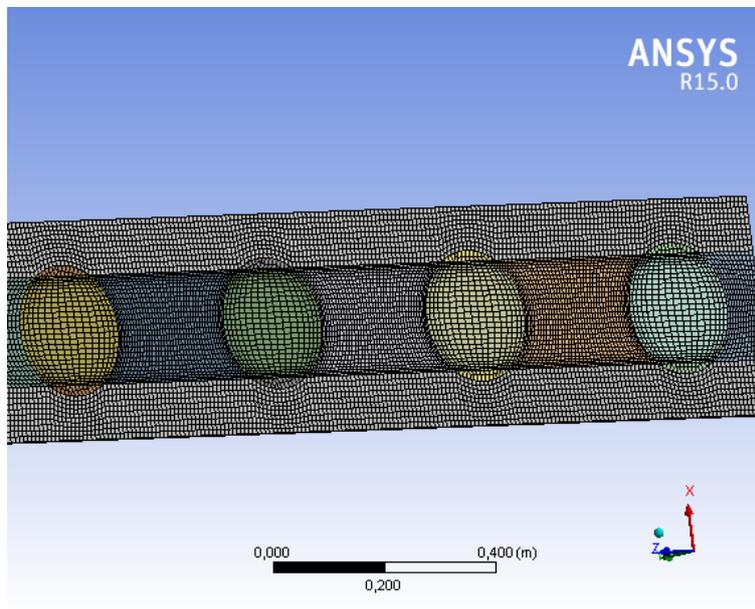


Рисунок 2. – Геометрия сетки

Решатель ANSYS использует 2 k-е модель турбулентности. Рассмотрим работу асинхронного турбулятора. Из рис. 3 по цветовой шкале видно, что для разных фаз поворота прерывателя давление изменятся равномерно вдоль оси модели. Временной шаг в модели $\nu = 0.0025$ с.

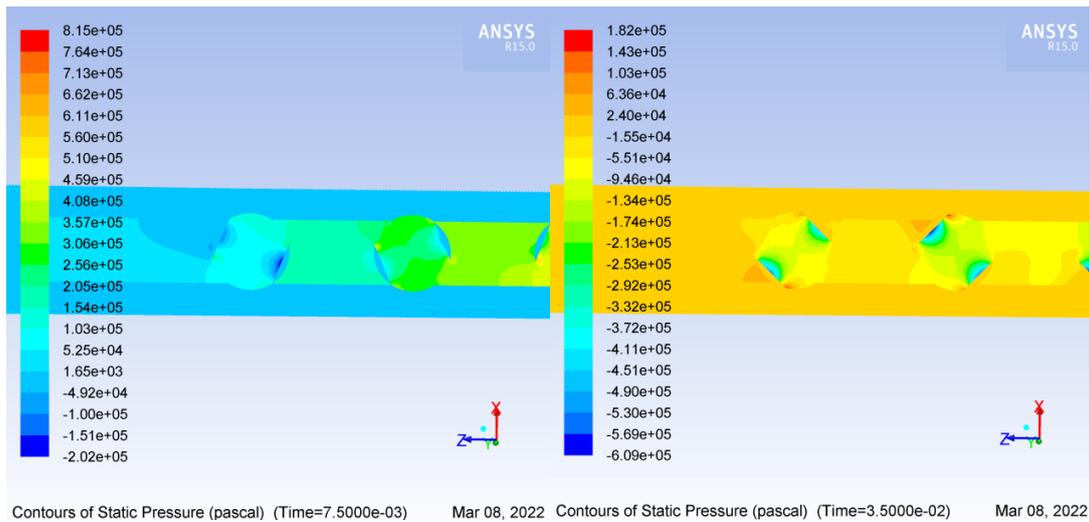


Рисунок 3. – Поле давления в различные моменты времени в асинхронном турбуляторе

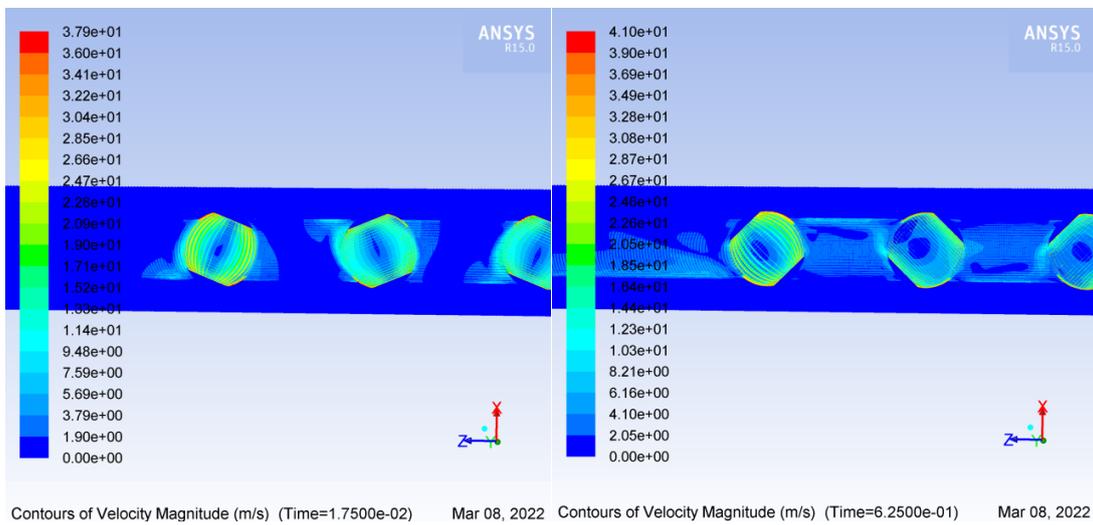


Рисунок 4. – Поле скорости в асинхронном турбуляторе

На рис. 4 показано поле скорости в асинхронном турбуляторе. Особенность поля в асинхронном турбуляторе по сравнению с синхронным турбулятором заключается в том, что фактически с начала вращения до установившегося режима частицы жидкости проходят «лестничную» траекторию, прижимаясь то к верхней, то к нижней стенке трубы. При этом увеличивается длина траектории движения и время перемешивания частиц жидкости в устройстве (качество перемешивания).

Пояснения к рис. 5. В асинхронном турбуляторе происходит настолько сильное перемешивание частиц жидкости, что в выходном потоке воды (левая часть модели) интенсивность турбулентности достигает 140–200%.

В асинхронном турбуляторе по сравнению с синхронным турбулятором выходная часть трубы заполнена плотнее областями с высоким значением интенсивности турбулентности или турбулентной вязкости. Это связано не только с лестничной траекторией частиц, но и также с противоположным вращением сферических

прерывателей. В результате чего вихри с вращением по часовой стрелке катятся по верхней стенке трубы, а вихри с вращением против часовой стрелки скатываются по нижней стенке. В итоге вся труба равномернее заполняется вихрями, а перемешивание в асинхронном турбуляторе качественнее, чем в синхронном.

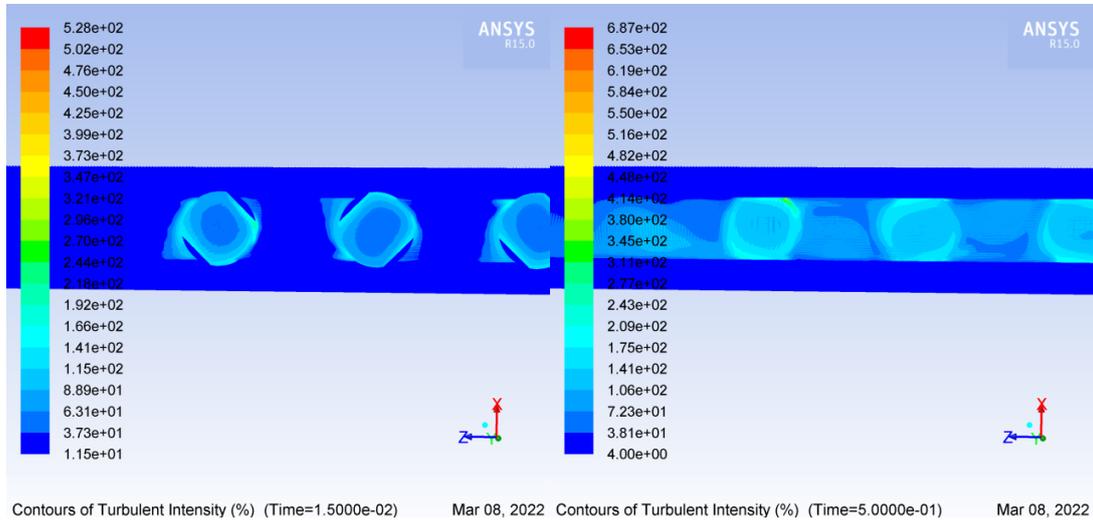


Рисунок 5. – Поле интенсивности турбулентности в асинхронном турбуляторе

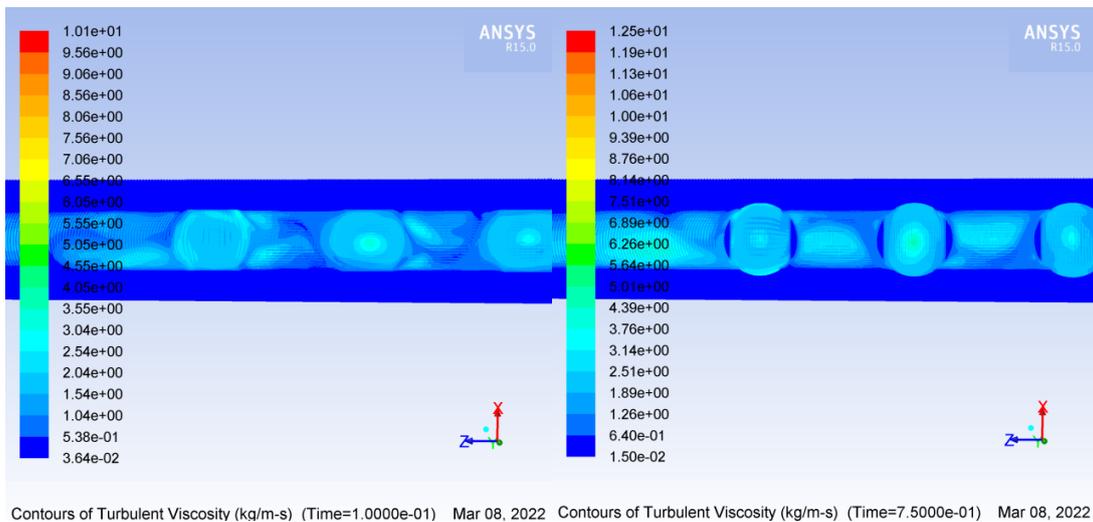


Рисунок 6. – Поле турбулентной вязкости в асинхронном турбуляторе

Рассмотрим характеристики синхронного турбулятора. Поле давления рис. 7 аналогично полю давления на рис. 3. На поле скорости рис. 8 видно, что наибольший ток жидкости у верхней стенки, в который попадают вихри с направлением вращения по часовой стрелки и поддерживают данный поток. Поясним рисунки 9 и 10. На рис. 9 на верхней стенке интенсивность турбулентности достигает 200% на выходе из устройства. Хотя на нижней стенке она ниже, 40–70%, как видно из цветовой диаграммы. Из рис. 10 видно, что на выходе образуется цепочка отдельных вихрей, которые движутся справа налево.

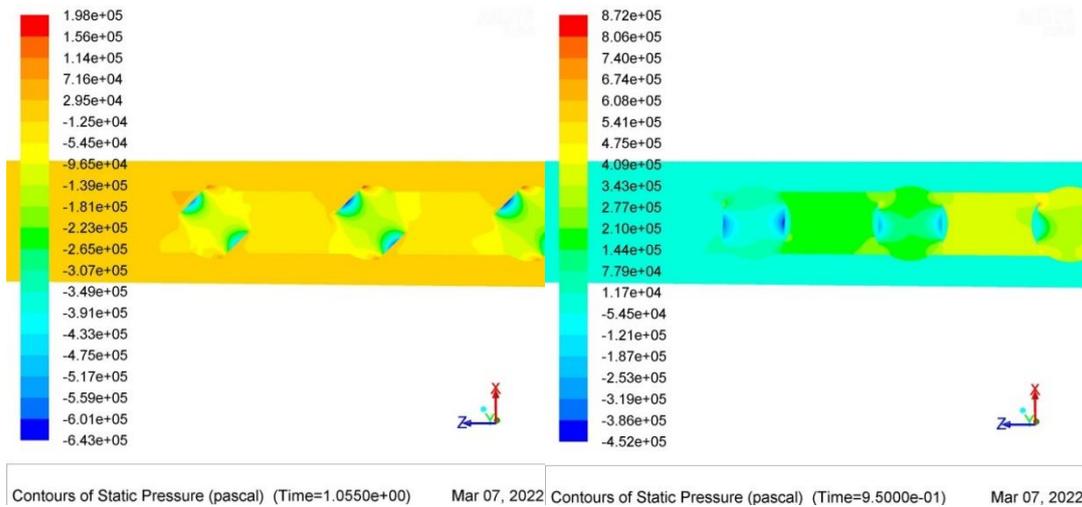


Рисунок 7. – Поле давления в различные моменты времени в синхронном турбуляторе

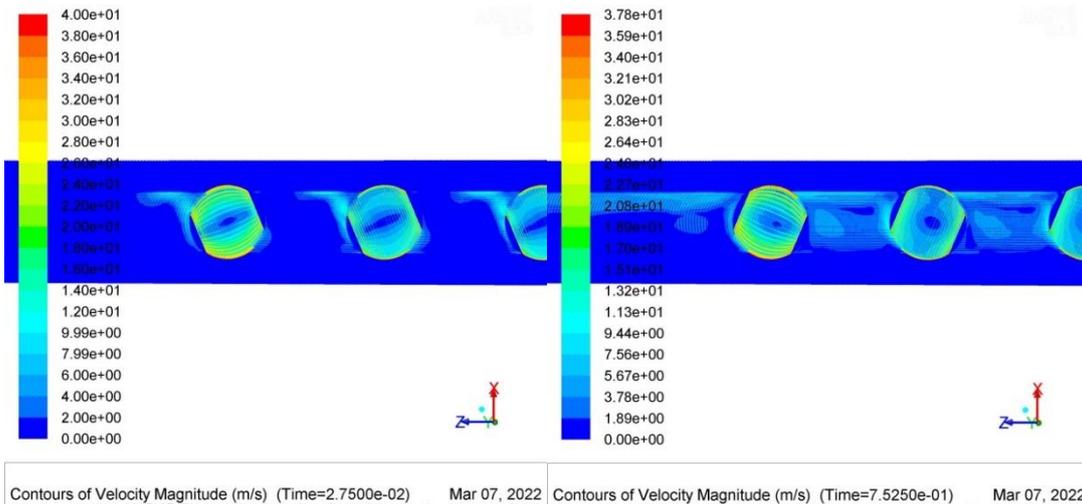


Рисунок 8. – Поле скорости в синхронном турбуляторе

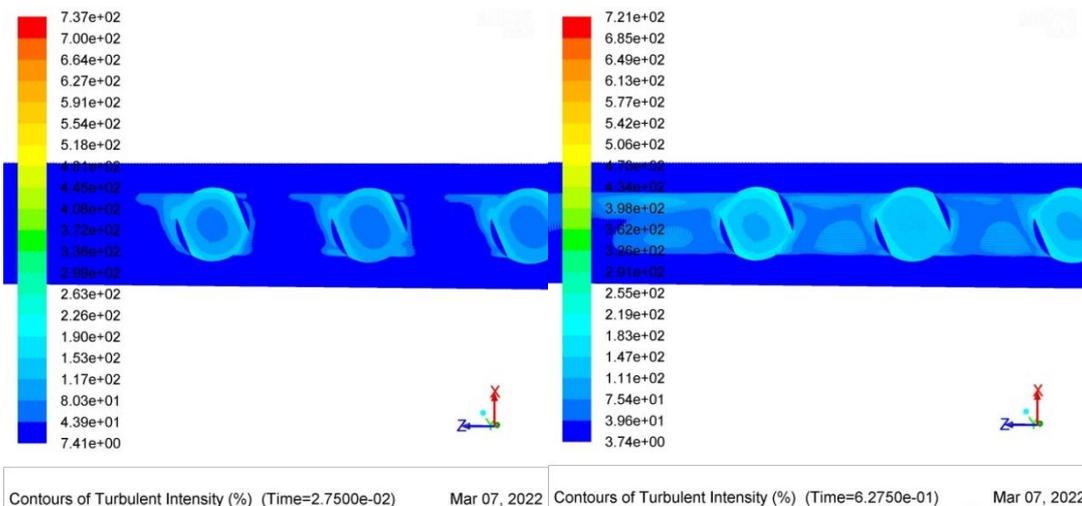


Рисунок 9. – Поле интенсивности турбулентности в синхронном турбуляторе

Для синхронного турбулятора на рисунках 7, 8, 9, 10 показано согласованное движение прерывателей с одним и тем же углом поворота цилиндрического канала. В то же время в асинхронном турбуляторе на рисунках 3, 4, 5, 6 сумма углов поворота соседних прерывателей равна π .

Из рис. 3, 7 для поля давления видно, что максимальный локальный перепад давления в 4 атмосферы существует только у лопаток прерывателей. Максимальная толщина лопатки сферического прерывателя составляет 2 см, что вполне достаточно, чтобы лопатка выдержала давление в 4 атмосферы и изгибающую нагрузку. Причем видно, что наименьшее давление сосредоточено на внутренней стороне лопатки, поэтому деформация лопаток направлена внутрь прерывателя и не может остановить вращения устройства. Что очень важно конструктивно.

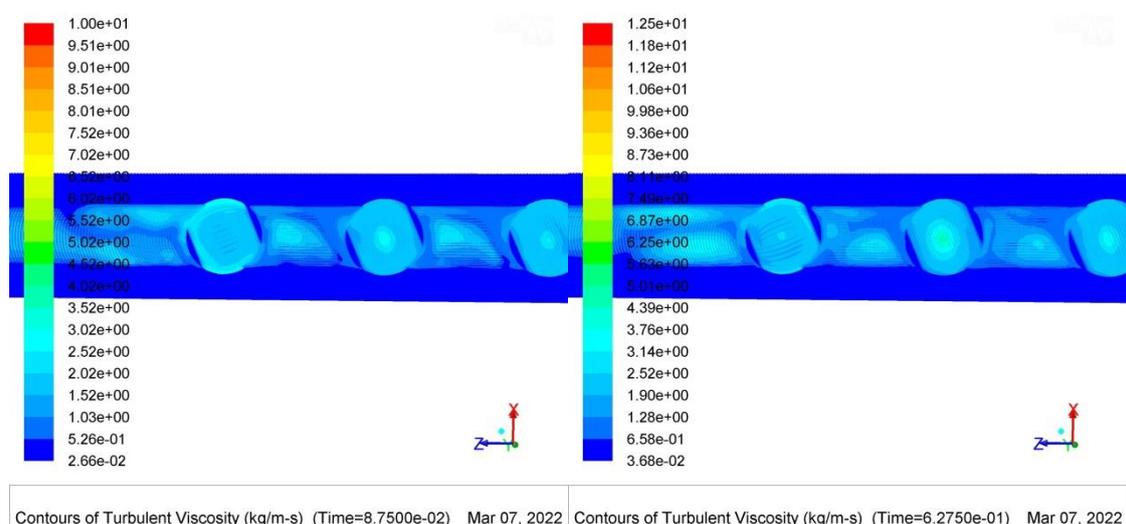


Рисунок 10. – Поле турбулентной вязкости в синхронном турбуляторе

Все сказанное отдает предпочтение в пользу применения асинхронного турбулятора по сравнению с синхронным. Хотя технически осуществить согласованное вращение нескольких прерывателей для синхронного турбулятора проще, чем для асинхронного. Отметим, что качественное моделирование в ANSYS Fluent важно как в практических задачах со сложной геометрией, так и в задачах гидродинамики с простой геометрией, в которых результаты получены другими методами, например, в работах[2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13].

ЛИТЕРАТУРА

1. Сперанская О. А. и др. Моделирование быстропериодического прерывания потока жидкости под давлением в оболочке ANSYS Fluent // В сборнике: Информационно-коммуникационные технологии, достижения, проблемы, инновации (ИКТ-2018). Электронный сборник статей 1 международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета. – 2018. – С. 92–95.

2. Волосова, Н. К., Басараб, М. А., Волосов, К. А., Волосова, А. К., Пастухов, Д. Ф., Пастухов, Ю. Ф. Простейшая математическая модель образования фибрина в аневризмах кровеносных капилляров // Евразийское Научное Объединение. – 2021. – № 10-1 (80). – С. 17–23.
3. Волосова, Н. К., Басараб, М. А., Волосов, К. А., Волосова, А. К., Пастухов, Д. Ф., Пастухов, Ю. Ф. Обобщенная модель открытой каверны для аневризмы кровеносных сосудов // Евразийское Научное Объединение. – 2021. – № 8-1 (78). – С. 34–38.
4. Волосова, Н. К. Нестационарная гидродинамическая задача в открытой прямоугольной каверне // Евразийское Научное Объединение. – 2021. – № 3-1 (73). – С. 16–21.
5. Волосова, Н. К., Басараб, М. А., Волосов, К. А., Волосова, А. К., Пастухов, Д. Ф., Пастухов, Ю. Ф. О роли профиля скорости на верхнем отрезке в гидродинамической задаче для прямоугольной каверны // Евразийское Научное Объединение. – 2020. – № 5-1 (63). – С. 11–17.
6. Волосова Н.К. Возможные виды течения в закрытой каверне и противоречия в задаче с подвижной крышкой // Евразийское Научное Объединение. – 2020. – № 12-1 (70). – С. 4–14.
7. Волосова, Н. К., Басараб, М. А., Волосов, К. А., Волосова, А. К., Пастухов, Д. Ф., Пастухов, Ю. Ф. Вычисление поля давления по полю скорости в гидродинамической задаче для прямоугольной каверны // Евразийское Научное Объединение. – 2020. – № 9-1 (67). – С. 1–8.
8. Волосова, Н. К. О нестационарном уравнении диффузии с полной производной по времени на прямоугольнике // Евразийское Научное Объединение. – 2021. – № 1-1 (71). – С. 9–14.
9. Волосова, Н. К. Мягкие краевые условия в гидродинамической задаче для профиля скорости в открытой прямоугольной каверне // Евразийское Научное Объединение. – 2021. – № 5-1 (75). – С. 9–14.
10. Волосова, Н. К., Басараб, М. А., Волосова, А. К., Зайцев, В. Ф., Волосов, К. А., Пастухов, Д. Ф., Пастухов, Ю. Ф. Этап конструирования математической модели аневризмы. Течения в каверне и противоречия в задаче в «закрытой» кювете // В сборнике: Некоторые актуальные проблемы современной математики и математического образования. Материалы 74-й научной конференции «Герценовские чтения 2021». Санкт-Петербург, 2021. – С. 208–213.
11. Волосова, Н. К., Волосов, К. А., Волосова, А. К., Пастухов, Д. Ф., Пастухов, Ю. Ф., Сперанская О. А. Геометрический подход для качественного поиска конвективных ячеек по температурному полю // Евразийское Научное Объединение. – 2021. – № 6-1 (76). – С. 21–27.
12. Пастухов, Д. Ф., Пастухов, Ю. Ф., Волосова, Н. К., Волосова, К. А., Волосова, А. К. Численные методы. Лекции. Численный практикум. Учебное пособие к лекционным и практическим занятиям для студентов специальности 1-40 01 01 Программное обеспечение информационных технологий 1-98 01 01 Компьютерная безопасность/ Новополюцк. Москва, 2021. (3-е изд., дополненное).
13. Волосова, Н. К. Математическая модель динамики образования фибрина в аневризмах кровеносных капилляров // Евразийское Научное Объединение. – 2021. – № 12-1 (63). – С. 11–17.