

*д.т.н. Мочалин Е.В.,
Мочалина И.Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЗАКРУЧЕННЫХ ПОТОКОВ, ХАРАКТЕРНЫХ ДЛЯ ВИХРЕВЫХ И ЦИКЛОННЫХ КАМЕР

Показано, що застосування осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса із замиканням на основі диференціальних рівнянь переносу турбулентних напружень забезпечує адекватний розрахунок закручених внутрішніх потоків. Приведено результати, що підтверджують правильне відтворення основних особливостей течій у вихрових і циклонних камерах.

***Ключові слова:** вихрова камера, гідроциклон, закручений потік, модель турбулентності, чисельний аналіз.*

Показано, что применение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с замыканием на основе дифференциальных уравнений переноса турбулентных напряжений обеспечивает адекватный расчет закрученных внутренних потоков. Приведены результаты, подтверждающие правильное воспроизведение основных особенностей течений в вихревых и циклонных камерах.

***Ключевые слова:** вихревая камера, гидроциклон, закрученный поток, модель турбулентности, численный анализ.*

Характеристика проблемы. Закрученные внутренние течения жидкости встречаются во многих технических системах и технологических процессах. Особенно широкое применение получили вихревые и циклонные камеры различной конструкции. В частности, в горно-обогатительном комплексе широко используются гидроциклоны и центробежные пылеуловители. Вихревые топки и центробежные форсунки нашли применение в энергетике.

Применение этих устройств основано на использовании свойства закрученных потоков интенсифицировать процессы тепло- и массообмена. Однако наличие неоднородного поля центробежных сил проявляется в возникновении вторичных течений и крупномасштабных вихревых структур, которые существенным образом меняют характер движения жидкости. Трехмерный характер течений в вихревых и циклонных камерах не позволяет получить упрощенные аналитические решения

уравнений движения жидкости. А сильное взаимодействие полей давления, центробежных сил и турбулентных напряжений определяет сложность численного моделирования таких течений даже на основе современных достижений вычислительной гидромеханики.

Перечисленные обстоятельства способны объяснить тот факт, что проектирование и расчет гидроциклонов до настоящего времени выполняется на основе эмпирических соотношений и зависимостей [1,2], что ограничивает возможности совершенствования их конструкции и поиска новых технических решений. Большие перспективы в этом плане имеет численный анализ в достаточно подробной постановке, учитывающей все основные особенности закрученных течений в циклонных и вихревых камерах. Однако, многие расчетные модели и, в частности, модели турбулентности, успешно работающие в других случаях, не способны адекватно описывать течения рассматриваемого типа [3]. Это связано, в первую очередь, с анизотропией турбулентности, которая свойственна закрученным потокам. В то же время большинство популярных дифференциальных моделей турбулентности, используемых для замыкания уравнений Рейнольдса осредненного движения жидкости, основаны на гипотезе Буссинеска о турбулентной вязкости, которая считается изотропной [4].

Целью настоящей работы является обоснование модели турбулентности и основных подходов к численному анализу, обеспечивающих адекватный расчет закрученных внутренних течений, характерных для вихревых и циклонных камер.

Основные результаты. В качестве модельной задачи рассмотрим течение несжимаемой жидкости внутри вращающегося цилиндра с подачей жидкости через пронизываемую боковую поверхность. Такое течение представляет собой частный случай потока в вихревой камере с боковым подводом. Расчетная схема задачи представлена на рисунке 1.

В основу численного решения положены нестационарные уравнения Рейнольдса осредненного турбулентного движения, дополненные дифференциальными уравнениями переноса турбулентных (Рейнольдсовых) напряжений. Для сравнения рассматривались также варианты применения более экономных двухпараметрических моделей турбулентности, основанных на гипотезе Буссинеска о турбулентной вязкости. Главным недостатком последних в контексте рассматриваемой задачи, как уже отмечалось, является допущение об изотропности турбулентного обмена импульсом.

В качестве основной рассматривалась осесимметричная постановка задачи. Однако для обоснования достоверности выполнялись более затратные сравнительные просчеты в трехмерной постановке. Граничные

условия для уравнений переноса компонент импульса и уравнения неразрывности имеют следующий вид (обозначения границ на рисунке 1):

$$\Gamma_1: V_r = -\frac{Q}{2\pi Rl}, V_\varphi = \Omega R, V_z = 0;$$

$$\Gamma_2: V_r = 0, V_\varphi = 0, V_z = 0;$$

$$\Gamma_3: V_r = 0, V_\varphi = \Omega r, V_z = 0;$$

$$\Gamma_4: p = p_a;$$

где V_r, V_φ, V_z – радиальная, окружная и осевая составляющие вектора скорости жидкости; r – радиальная координата; p – статическое давление; p_a – постоянное значение давления в выходном сечении.

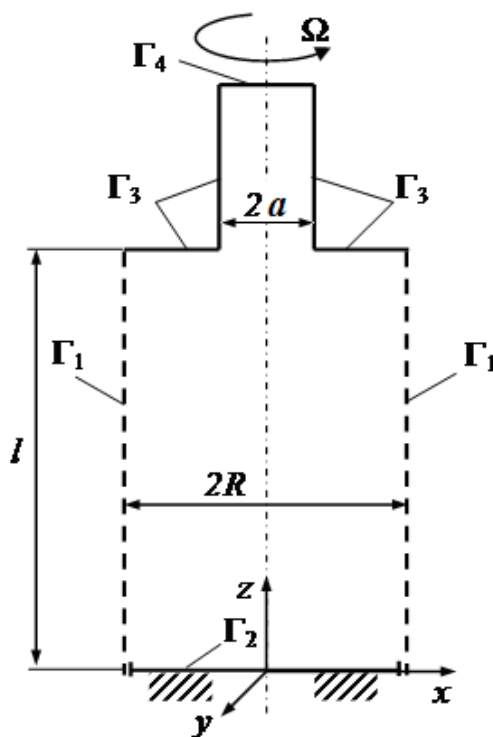


Рисунок 1 – Расчетная схема области течения внутри вращающегося пронизаемого цилиндра

Граничные условия для уравнений переноса характеристик турбулентности зависят от выбора модели турбулентности и обсуждаются, в частности, в работах [4,5]. Расчеты выполнялись для размеров $R = 0.0385$ м, $l = 0.125$ м, $a = 0.01$ м.

Подробности численного решения, положенного в основу расчетного моделирования изложены в монографии [5]. Отметим здесь только основные особенности использованного подхода, основанного на конечно-объемной технологии:

- использование аппроксимационных схем 2-го, 3-го порядков с подавлением нефизических осцилляций расчетных величин;
- неявная схема 2-го порядка для дискретизации по времени;
- применение схемы SIMPLEC для расчета поля давления;
- использование техники нижней релаксации для контроля сходимости;
- применение алгебраического многосеточного ускорителя (метод AMG) для решения систем линейных уравнений.

Отдельно рассматривался вопрос о моделировании пристеночной турбулентности. В этом смысле сопоставлялись результаты, полученные с подробным разрешением ламинарного подслоя и с применением пристеночных функций на более грубой (высокорейногльдсовой) сетке. По результатам моделирования можно сказать, что этот фактор не оказывает существенного влияния на результаты расчета.

На рисунке 2 представлены расчетные линии тока в продольном сечении вращающегося цилиндра, построенные по результатам расчетов, выполненных с применением модели переноса Рейнольдсовых напряжений (модель RSM) и RNG $k-\varepsilon$ модели. Последняя представляет двухпараметрические градиентные дифференциальные модели турбулентности и, в отличие от стандартной $k-\varepsilon$ модели, способна в определенной степени учитывать кривизну линий тока. Сразу отметим, что рассматривались и другие дифференциальные модели, в частности, стандартная $k-\omega$ модель и SST $k-\omega$ модель Ментера. Результаты их применения в данном случае слабо отличаются от результатов, полученных на основе RNG $k-\varepsilon$ модели.

Обе модели отражают наличие вторичных, в том числе и рециркуляционных течений в осевом направлении и тот факт, что почти весь поступающий через боковую поверхность поток проходит через торцевые пограничные слои. В то же время модель RSM дает более выраженный сдвиговый слой у границы приосевой области (центральной части вихря) и демонстрирует факт существования этой зоны, заполненной рециркуляционными токами, вдоль всей оси цилиндра. RNG $k-\varepsilon$ модель демонстрирует более резкий сдвиговый слой у внутренней поверхности цилиндра и ограничивает приосевую рециркуляционную зону выходным патрубком. Первый результат лучше согласуется с известными данными, полученными для вихревых камер.

Как и для вихревых камер [6], распределения окружной скорости и статического давления в различных поперечных сечениях очень близ-

ки друг к другу (за исключением приторцевых областей). В безразмерном виде характерные расчетные профили скорости и давления представлены на рисунке 3.

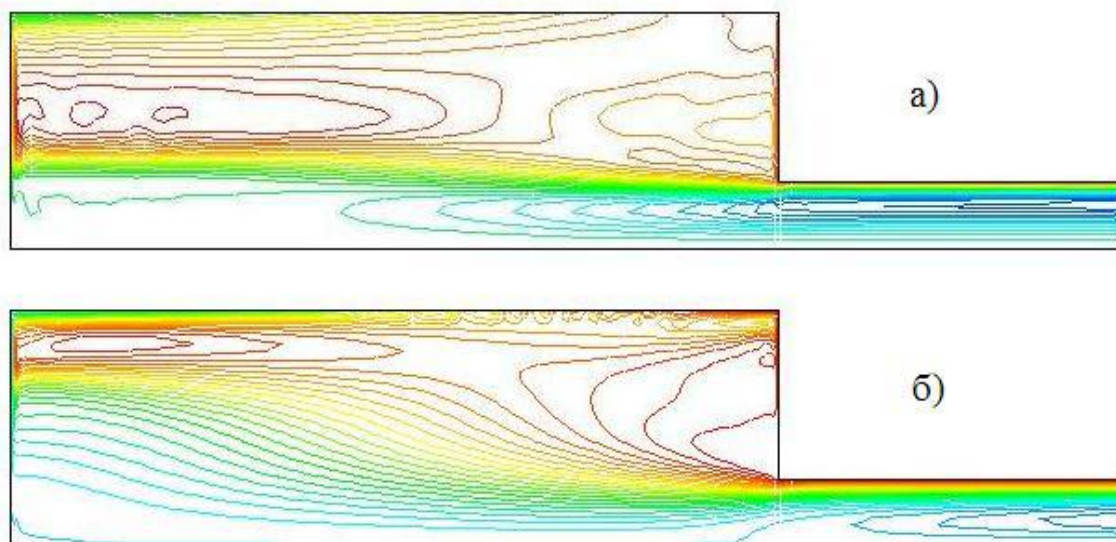


Рисунок 2 – Линии тока относительного течения внутри вращающегося проницаемого цилиндра, рассчитанные с применением моделей турбулентности RSM (а) и RNG $k-\varepsilon$ (б)

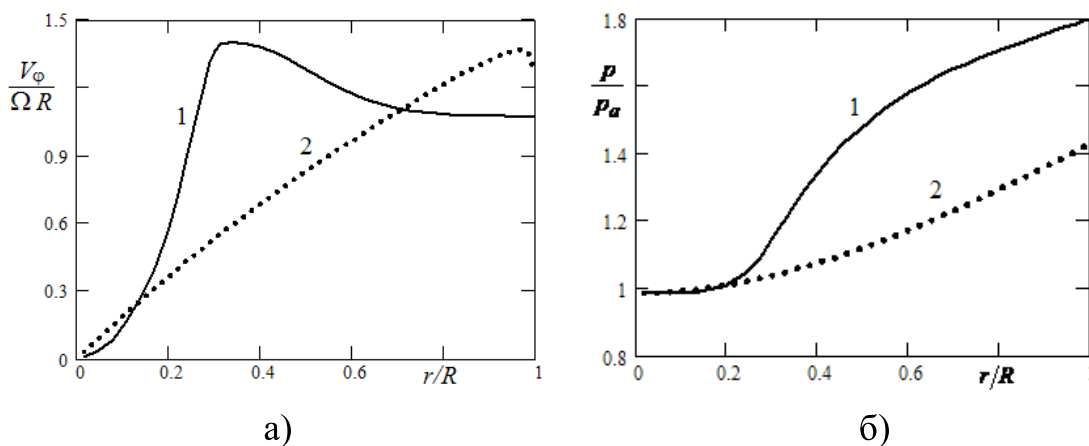


Рисунок 3 – Расчетные профили окружной скорости (а) и давления (б) в поперечном сечении вращающегося проницаемого цилиндра: 1– модель RSM; 2– RNG $k-\varepsilon$ модель

Распределение окружной скорости, полученное с применением модели RSM, качественно согласуется с профилем, характерным для

вихревых камер. RNG $k-\varepsilon$ модель дает совершенно отличный профиль. Соответственно, и распределения давлений сильно отличаются. При этом, рассчитанный на основе модели RSM максимальный перепад давлений хорошо согласуется с экспериментальными значениями, полученными на физической модели. А модели, основанные на использовании турбулентной вязкости, занижают перепад давлений почти вдвое.

Выводы. Выполненными исследованиями показано, при численном моделировании закрученного течения, характерного для вихревых и циклонных камер, применение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса дает удовлетворительные результаты только при замыкании на основе дифференциальных уравнений переноса турбулентных напряжений (модель RSM). При этом адекватно отражается наличие приосевой зоны с интенсивным рециркуляционным движением жидкости и разрежением относительно давления в области истечения. Воспроизводится также выраженный сдвиговый слой вдоль границы приосевой зоны, а также характерный профиль окружной скорости, имеющий сходство с вихрем Рэнкина.

Тем самым определен подход к численному моделированию, на основе которого возможен прогресс в совершенствовании технических характеристик вихревых и циклонных камер.

В дальнейших исследованиях представляет интерес развитие полученных результатов в плане моделирования течения различных многокомпонентных сред в вихревых и циклонных камерах.

Библиографический список.

1. Поваров А.И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках / А.И. Поваров.– М.: Недра, 1978.– 232 с.
2. Акопов М.Г. Основы обогащения углей в гидроциклонах / М.Г. Акопов.– М.: Недра, 1967.
3. Matvienko O.V. Analysis of turbulence models and investigation of the structure of the flow in a hydrocyclone / O.V. Matvienko // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*.– 2004.– V. 77, №. 2.– P. 316 – 323.
4. Белов И.А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие / И.А.Белов, С.А.Исаев.– СПб.: Балт. гос. тех. университет, 2001.– 108 с.
5. Мочалин Е.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил / Е.В. Мочалин, А.А. Халатов.– Киев: ИТТФ НАН Украины, 2010.– Т.8: Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах.– 428 с.
6. Гольдштик М.А. Вихревые потоки / М.А. Гольдштик.– Новосибирск: Наука, 1981.– 366 с.