

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В ЦЕНТРОБЕЖНО-РОТОРНОМ ДИСМЕМБРАТОРЕ

А.А. Ситников, Н.А. Макарова, Ю.Н. Камышов,
С.В. Почтер, Е.Н. Нефедов

В статье представлены результаты численного моделирования трехмерного течения в трехступенчатом центробежно-роторном дисмембраторе. Рассматривался вариант нестационарного течения. Получено хорошее согласование рассчитанных полей скоростей, давлений и температур с математической моделью движения вязкой несжимаемой жидкости, в частности, выявлено образование кольцевых вихрей.

Ключевые слова: дисмембратор, моделирование, ротор, статор, давление, вязкость, поток, открытие канала, температура

Центробежно-роторные дисмембраторы являются эффективным оборудованием для многофакторного импульсного воздействия на гетерогенную жидкость. Они используются для измельчения и механической активации неабразивных дисперсных материалов многократным свободным ударом в проходном режиме при производстве тонкодисперсных материалов. Технологии и технологические комплексы на базе центробежно-роторных дисмембраторов позволяют получать высококачественные технологические, пищевые и биологически активные растворы экстрактов, эмульсии, суспензии.

Перспективным направлением в сельском хозяйстве является использование различного рода дисмембраторов для получения жидких кормовых смесей. Использование кормов, полученных с помощью центробежно-роторного дисмембратора, позволяет уменьшить расход электроэнергии, затрачиваемой на их приготовление, снизить потребление воды животными в среднем на 30%, снизить расхода зерновой смеси в 2 раза [1].

Компьютерное моделирование является одним из эффективных методов изучения сложных систем. Такие модели проще и удобнее проводить так называемые вычислительные эксперименты, в тех случаях, когда реальные эксперименты затруднены из-за финансовых или физических препятствий или могут дать непредсказуемый результат. Логичность и формализованность компьютерных моделей позволяет выявить основные факторы, определяющие свойства изучаемого объекта-оригинала (или целого класса объектов), в частности, исследовать отклик моделируемой физической системы на изменение ее параметров и начальных условий.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК 1/1-2012

Цель работы – методами компьютерного моделирования провести виртуальный эксперимент для исследования процессов, происходящих при работе центробежно-роторного дисмембратора.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать трехмерные геометрические модели ротора и статора дисмембратора;
- провести мессинг геометрической модели;
- задать начальные и граничные условия задачи, получить решение по модели стоячего ротора для инициализации начального положения системы;
- провести моделирование вращения ротора и проанализировать полученные результаты.

Математическая модель

Уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости (в отсутствие внешних массовых сил) имеют вид:

$$\operatorname{div} V = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} \equiv \frac{\partial v}{\partial t} + (V, \nabla)V = -\frac{1}{\rho} \operatorname{grad} P + \nu \Delta V \quad (2)$$

где V – поле скоростей частиц среды;

ρ – плотность;

P – давление;

ν – коэффициент кинематической вязкости – постоянная, характеризующая среду.

Условие прилипания. В соответствии с увеличением порядка дифференциального уравнения при переходе к случаю вязкой жидкости увеличивается и число граничных условий. Так, на твердых неподвижных границах в теории невязкой жидкости ставится одно условие непроницаемости $(V, n)=0$ (здесь n – вектор нормали к поверхности), а в теории вязкой жидкости – три (скалярных) условия

$$V = 0. \quad (3)$$

Это – так называемое условие прилипания, оно оправдывается многочисленными экспериментами и отражает тот факт, что между поверхностью твердого тела и вязкой жидкостью существуют силы молекулярного сцепления.

Учет вязкости. Для обычных сред (таких, как воздух или вода) коэффициент вязкости ν является малой величиной и, казалось бы, пренебрежение вязким членом (т.е. замена уравнения Навье – Стокса уравнением Эйлера для невязкой жидкости, которое значительно легче для исследования) не должно приводить к существенным ошибкам.

Однако это не так, и причиной тому является различие граничных условий для уравнений Эйлера и Навье – Стокса. Так, условие прилипания при отбрасывании вязкого члена становится переопределенным, и ему нельзя удовлетворить.

В силу этого условие прилипания фактически приводит к тому, что, несмотря на малость ν , в тонком слое вблизи границы градиенты скорости оказываются очень большими. Но тогда вязкие члены становятся по величине сравнимыми с остальными членами уравнения (3.2), и пренебрежение ими уже незаконно. Действие сил вязкости в пограничном слое приводит к отрыву этого слоя от граничной поверхности и в целом течение становится существенно отличным от того, которое получается в схеме невязкой жидкости. Так, в вязкой жидкости вследствие отрыва пограничного слоя за пограничным слоем образуются вихри.

Проблема изучения вязкой жидкости существенно осложняется ещё одним обстоятельством – при больших значениях безразмерного параметра

$$Re = \frac{(v \cdot l)}{\nu}, \quad (4)$$

где v – характерная величина скорости;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

l – характерный размер,

движение становится турбулентным. Эта безразмерная величина, называемая критерием Рейнольдса, характеризует отношение нелинейного и диссипативного членов в уравнении Навье-Стокса. Для описания турбулентных течений не существует полной системы уравнений, и поэтому в каждой конкретной задаче приходится делать дополнительные предположения, основанные на экспериментах [2].

Численные алгоритмы

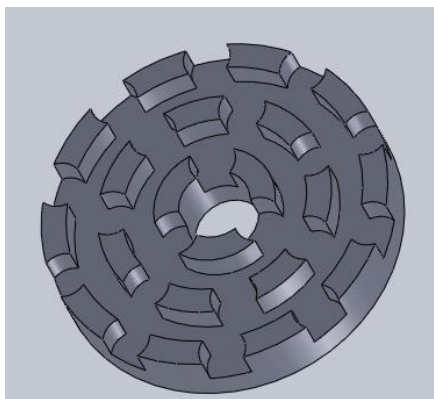
Вычисляемая жидкостная динамика (Computational Fluid Dynamics - CFD) – это компьютерная методика для имитации поведения системы, включающей в себя поток жидкости, перенос тепла и другие связанные физические процессы. Она работает, решая уравнения (в специальной форме), описывающие поток жидкости около интересующего региона с заданными (известными) условиями на границе этого региона.

Существует целый ряд различных методов решения, используемых в CFD. Самым распространенным и приемлемым по соотношению сложности расчетов/точность результатов является метод конечных объемов.

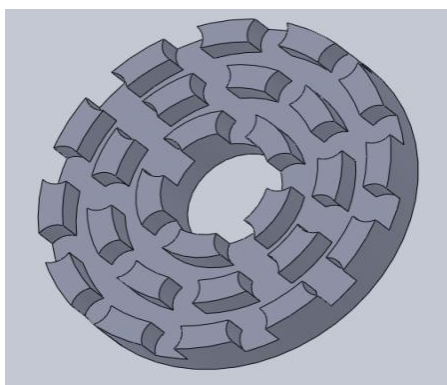
В этом методе интересующий регион разделяется на более мелкие домены, называемые контрольными объемами. Уравнения дискретизируются и решаются интерактивно для каждого контрольного объема. В результате может быть получено приближенное значение каждой переменной в конкретных точках по всему домену. Таким образом, складывается полная картина поведения потока.

Параметры моделирования

Анализ проводился на моделях ротора и статора, представленных на рисунке 1:



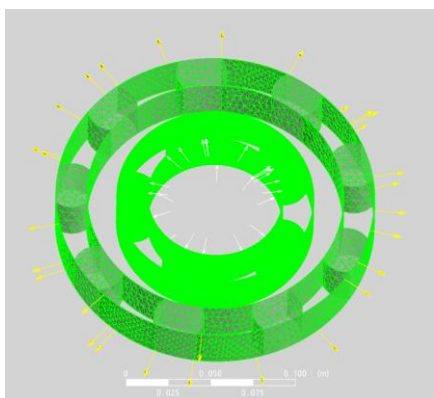
а)



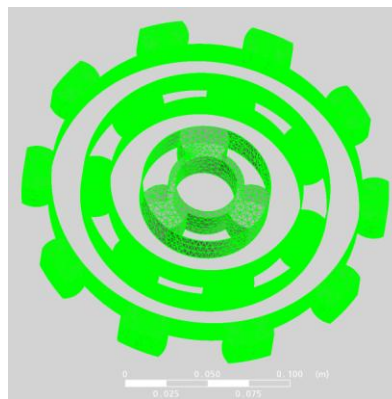
б)

Рисунок 1 – Геометрическая модель, где:
а - ротор; б - статор

Сетка накладывалась на область, по которой циркулирует жидкость – пространство между ротором и статором (зазор – 8 мм). Объемные тетраэдрные сетки для ротора и статора показаны на рисунке 2.



а)



б)

Рисунок 2 – Сеточные модели, где а - ротор;
б – статор

Особенности геометрии предполагают сложный мессинг: на каждый круг статора и ротора накладывается отдельная сетка. Это значительно увеличивает вычислительную сложность, а значит, и время расчета, но необходимо для корректного определения интерфейса взаимодействия между ротором и статором.

Физические и граничные условия:

–справочное давление (Reference Pressure) - 0 Pa (так как у нас моделируется поток жидкости и динамические изменения давления значительны по сравнению с абсолютным уровнем давления);

–перенос тепла (Heat Transfer) – общая энергия (Total Energy). Модель передачи тепла используется для прогнозирования температуры во всем потоке. Данная модель включает передачу тепла путем теплопроводности, конвекции, и (при необходимости) турбулентного перемешивания, а также вязких эффектов, нагревающих жидкость в пограничном слое;

–модель турбулентности (Turbulence) – так называемая «ка-эпсилон модель» (k-epsilon), о которой было рассказано выше;

–внешние условия: давление на входе (P-Total) – 1 атм., давление на выходе (P-Static) – 1 атм., температура (T-Total) - 25°C, направление потока (Flow Direction) – по нормали к границам (Normal to Boundary).

–Численные исследования были направлены на изучение характеристик потока жидкости, как давление, температура и скорость потока.

Контурная диаграмма показывает градиент давления ротора после одного оборота на рисунке 3.

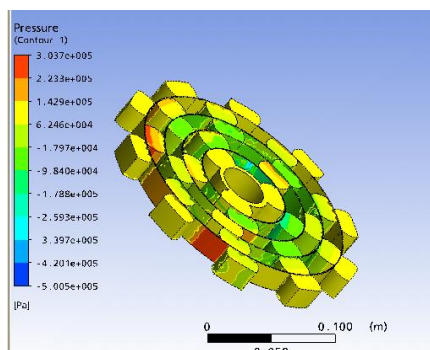


Рисунок 3 – Контурная диаграмма давления внутри потока

Видим, что на внешней границе модели давление достигает максимума – значения порядка 300000 Па. Из анализа легенды следует, что разброс значений составляет 800000 Па. Также наблюдаются области с отрицательным давлением. Это связано с тем, что, согласно [2], периодическое совмещение каналов статора с каналами вращающегося ротора приводит к пульсации потока жидкости. При совмещении каналов происходит нагнетание давления, затем, когда канал статора открывается, жидкость из области с высоким давлением устремляется в области с более низким давлением, что приводит к разрывам в потоке.

Проследим траектории пути частиц с нулевой массой через область с жидкостью и скорости, которые развивают данные частицы при движении по треку (рисунок 4).

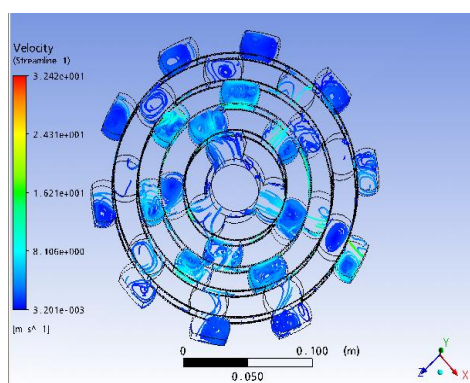


Рисунок 4 – Диаграмма распределения скоростей частиц с нулевой массой, движущихся от входа потока жидкости к выходу

Наблюдаются вихревые структуры и турбулизация потока. Поток имеет развитую турбулентность в связи с тем, что скорость потока жидкости к каналам статора велика и имеет флуктуации. Из рисунка 5 видно, что в областях, где каналы статора и ротора совмещены, скорость потока падает практически до нуля, тогда как максимум скорости составляет 32 м/с (рисунок 5).

Турбулентный характер движения жидкости в кольцевом вихре описывается коэффициентом турбулентной вязкости. График зависимости турбулентной вязкости от координаты Y приведен на рисунке 6. Все графики строились по 20 точкам, результаты считывались с поперечного сечения модели на среднем уровне (то есть на уровне зазора между ротором и статором)

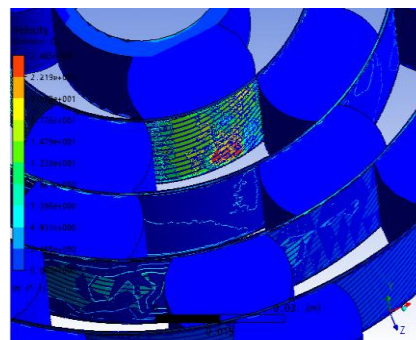


Рисунок 5 – Максимум скорости, достигаемый в областях интерфейса между ротором и статором

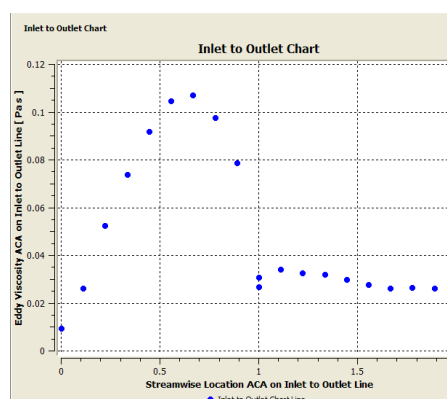


Рисунок 6 – График зависимости турбулентной вязкости от координаты точки на линии вход-выход потока

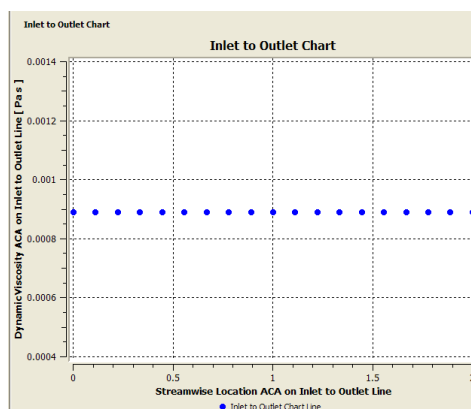


Рисунок 7 – График зависимости кинематической вязкости от координаты точки на линии вход-выход потока

Как сказано в [2], движение турбулентного вихря описывается уравнениями, в которые вместо кинематической вязкости входит турбулентная вязкость. Действительно, как видно из рисунка 7, значения кинематической вязкости значительно ниже турбулентной, а значит, она не оказывает влияния на процессы, происходящие в вихре. Важным следствием из этого является то, что структура кольцевого вихря не зависит (или, по крайней мере, зависит очень слабо) от деталей начальных и краевых условий. Усредненное движение в турбулентном вихре определяется только размером и скоростью вихря.

Из рисунка 8 видно изменение температуры потока жидкости. В целом, разница температуры составляет 0,2 градуса.

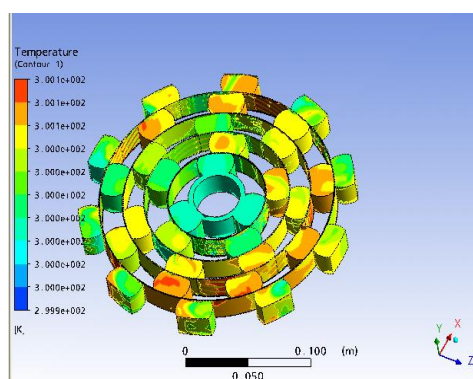


Рисунок 8 – Контурная диаграмма распределения температур от входа потока жидкости к выходу

На рисунке 9 показан график зависимости турбулентной энергии диссипации от координаты точки на линии вход-выход потока.

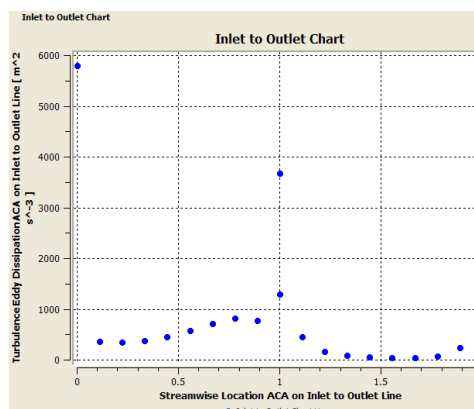


Рисунок 9 – График зависимости диссипации энергии от координаты точки на линии вход-выход потока

Как видно из графика скачок рассеивания происходит в районе единицы, что соответствует расположению интерфейса между ротором и статором.

За счёт диссипации части подводимой энергии в тепло, особенно в радиальном зазоре между ротором и статором, происходит нагрев обрабатываемой среды [3].

Проведенные численные моделирования течений в центробежно-роторном дисмембраторе позволяют сделать следующие **выводы**:

При моделировании вращения ротора образуются области с отрицательным давлением, в которых происходит разрыв потока.

В момент совмещения каналов ротора и статора происходит закрытие проходных каналов и наблюдается:

- нагнетание давления в проходных каналах;
- резкое падение скорости потока практически до нулевого уровня;
- повышение температуры жидкости;

При открытии проходных каналов наблюдается:

- резкое увеличение скорости потока;
- понижение температуры жидкости.

Также во время работы ротора наблюдалось образование кольцевых вихрей, поведение которых определяется только размером и скоростью вихря.

Таким образом, при вращении ротора возникают условия для возможного возникновения кавитации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Промтов М.А. Роторные импульсные аппараты и перспективы их применения.//Теоретические основы создания, оптимизации и управления энерго- и ресурсосберегающими процессами и оборудованием. Сб. трудов междунаро-д. науч. конф. Т. 1. Иваново: Изд-во Ив. гос. хим.-технол. ун-та, 2007. - с. 274 – 283.

2) Лаврентьев Л.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические проблемы, главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973.

3) Основы теории и расчета деталей роторного аппарата: Учебное пособие / В.М. Червяков, Ю.В. Воробьев. – Тамбов: Изд-во Тамбовского государственного ун-та, 2008.

Ситников А.А., д.т.н., профессор, зав кафедрой СХМ,

e-mail: sitalan@mail.ru,

Макарова Н.А., аспирант кафедры СХМ,

e-mail: nati-world@rambler.ru

Камышов Ю.Н., аспирант кафедры СХМ,

e-mail: kamishovun@mail.ru

Почтер С.В., аспирант кафедры СХМ,

e-mail: vgickne@rambler.ru

Нефедов Е.Н., заведующий лабораторией кафедры СХМ

e-mail: mip-shm@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»