

УДК [677. 021:533. 6]:519. 760

И. П. Горнаков, Е. Н. Калинин

Ивановский государственный политехнический университет

К ПОСТАНОВКЕ ЗАДАЧИ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ПРОЦЕССА КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ЖИДКОГО РАСТВОРА В ПОЛЕ ДЕЙСТВИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ

В статье представлены результаты 3D-моделирования гидродинамических процессов в центробежном выпарном аппарате в системе COMSOL Multiphysics. Для исследуемого процесса заданы рабочие кинематические параметры греющей поверхности, плотность и начальная температура концентрируемого раствора и рабочей среды.

Компьютерное моделирование, выпарной аппарат, концентрирование рабочего раствора.

The article presents the results of 3D-simulation of hydrodynamic processes in the centrifugal evaporation in the COMSOL Multiphysics system. The working kinematic parameters of the heating surface, the density and the initial temperature of the concentrated solution and the working environment are given for the process.

Computer simulation, evaporator, concentration of the working dis-solution.

Введение.

От эффективности организации в теплоиспользующих установках процессов тепло- и массопереноса зависят ресурсосберегающие показатели, в частности: продолжительность цикла обработки материалов, удельный расход энергии, химических реагентов, и, в конечном итоге, качественные показатели основного технологического процесса.

Основная часть.

Для повышения эффективности процесса концентрирования отработанных технологических растворов перспективным направлением является использование высокопроизводительных и компактных выпарных аппаратов, принцип работы которых основан на использовании воздействия силового поля центробежных сил и вихревого безотрывного движения пленочного потока концентрируемого раствора [2]. В качестве объекта анализа нами рассмотрен центробежный выпарной аппарат с трансформирующимися геометрическими параметрами [3].

В начальной стадии синтеза гидродинамической модели исследуемого процесса необходимо определить численные значения поля скоростей U и поля давлений P в ортогональной системе координат на основе решения уравнения Навье-Стокса в различные моменты времени анализируемого процесса. В виду многомерности решаемой задачи нами использован метод переменных направлений [2], [4].

$$\frac{\partial U_x}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + F_x,$$

где F_x – проекция массовой силы на ось Ox ; ν – кинематическая вязкость; ρ – плотность жидкости, кг/м^3 .

Конечно-разностная аппроксимация уравнения Навье-Стокса в направлении оси Ox по неявной разностной схеме и по явной в направлении оси Oy записана нами в виде:

$$\frac{U_x^{k+\frac{1}{2}} - U_x^k}{\tau/2} = -U_x^k \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} \right)^{k+\frac{1}{2}} - U_y^k \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} \right)^k + \nu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} \right)^{k+\frac{1}{2}} + \nu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right)^k - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^{k+1} + F_x^{k+1}.$$

По явной разностной схеме и по неявной в направлении оси Oy конечно-разностная аппроксимация уравнения Навье-Стокса в направлении оси Ox имеет вид:

$$\frac{U_x^{k+1} - U_x^{k+\frac{1}{2}}}{\tau/2} = -U_x^{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{\partial U_x}{\partial x} \right)^{k+\frac{1}{2}} - U_y^{k+\frac{1}{2}} \left(\frac{\partial U_x}{\partial y} \right)^{k+1} + \nu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} \right)^{k+\frac{1}{2}} + \nu \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right)^{k+1} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^{k+1} + F_x^{k+1}.$$

Реализуемый конечно-разностный алгоритм в качестве неизвестных содержит значения скорости

$U_{xi+1,j}^{k+k}, U_{xi,j}^{k+k}, U_{xi-1,j}^{k+k}$ потока в предыдущем, текущем и последующем узлах конечно-разностной сетки соответственно. Для реализации синтезированного алгоритма последнее уравнение приведено к виду, которое способствует решению методом прогонки [2]:

$$a_i U_{xi-1,j}^{k+1} + b_i U_{xi,j}^{k+1} + c_i U_{xi+1,j}^{k+1} = f_i,$$

где a_i, b_i, c_i – коэффициенты прогонки.

В связи с этим для синтеза и численной реализации методом конечных элементов (численного решения) 3D-модели анализируемого гидродинамического процесса, представленного в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных, нами использована система мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics.

Для анализа тепло-массообменного процесса, протекающего в исследуемом выпарном аппарате, нами создана упрощенная 3D-модель греющей поверхности аппарата (рис. 1) в форме цилиндрической поверхности с сеткой с размером элементов от 0,1 до 0,4 и максимальной скоростью роста элемента 1,25. При этом для реализации метода конечных элементов мы исходили из следующих соображений. Область n -мерного пространства, как частного решения системы дифференциальных уравнений, разбивалась на конечное количество подобластей (элементов), в каждом из которых был выбран вид аппроксимирующей функции, чем определялись основные функциональные свойства математической модели,

точность которой находится в прямой зависимости от количества таких областей и в обратной зависимости от размера самой области. Этими же показателями определяются и экономические параметры модели – время и вычислительные ресурсы для ее реализации.

В результате расчета модели созданы предпосылки для решения задачи кинематического синтеза, определяющим динамическую картину поля окружающих скоростей вихревого безотрывного пленочного потока концентрируемого раствора, движущегося по цилиндрической греющей поверхности в поле действия гравитационных сил (рис. 2) и поле давлений (рис. 3), из которых в любой точке аппарата можно узнать значение скорости и давления, а также проследить их динамику.

В качестве концентрируемого раствора был разбавленный щелочной раствор NaOH, а в качестве материала стенки греющей поверхности аппарата выбрана сталь (нержавеющая кислото-щелочно-устойчивая марки 12X18H9T).

Построенная модель является весьма упрощенным представлением реального выпарного аппарата, а расчеты выполнены на достаточной разреженной сетке. Это вызвано высокой требовательностью вычислительной системы к вычислительным ресурсам. При этом очевидно, что ввиду большой вычислительной емкости рассматриваемой задачи для ее качественного решения необходимо задействовать все имеющиеся ресурсы, оптимально распределив (распараллелив) вычислительный процесс между процессорами и видеокартами.

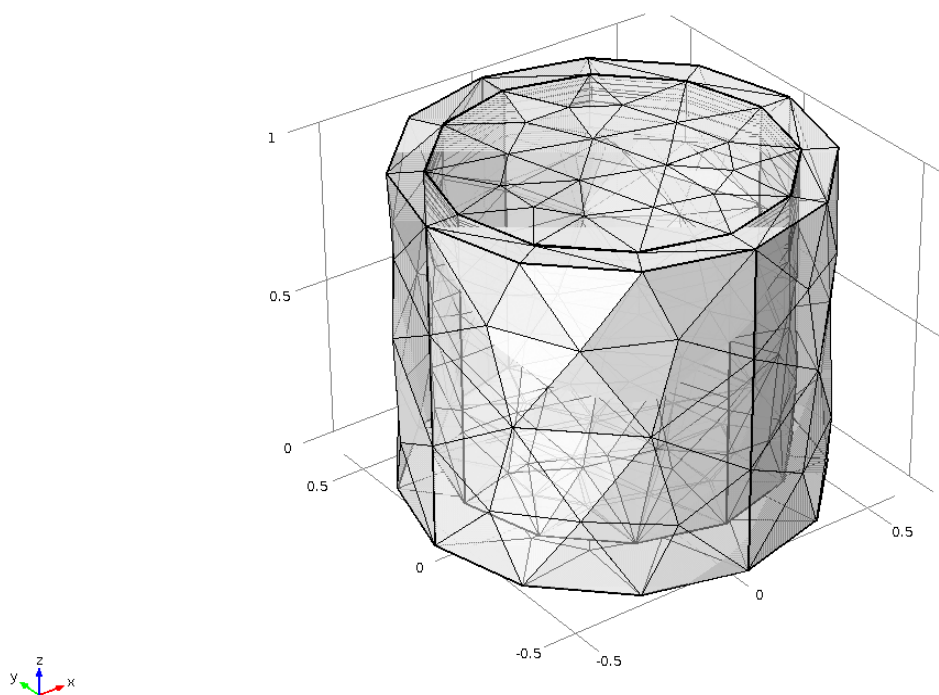


Рис. 1. 3D-модель греющей поверхности аппарата с наложенной расчетной сеткой

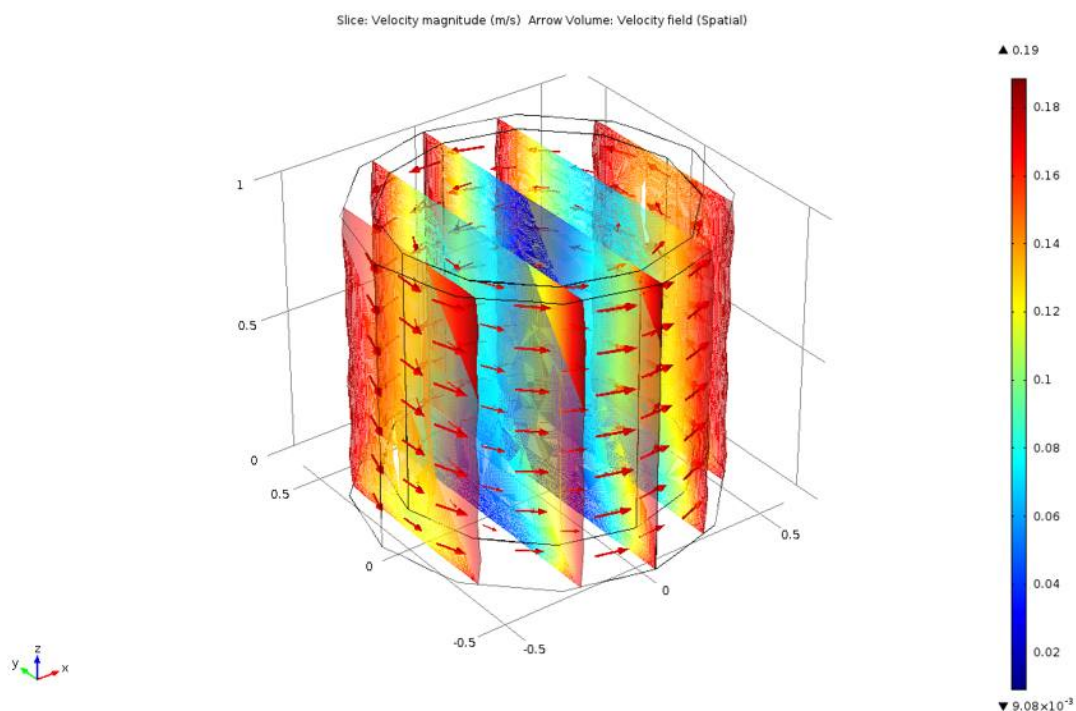


Рис. 2. Поле окружных скоростей потока

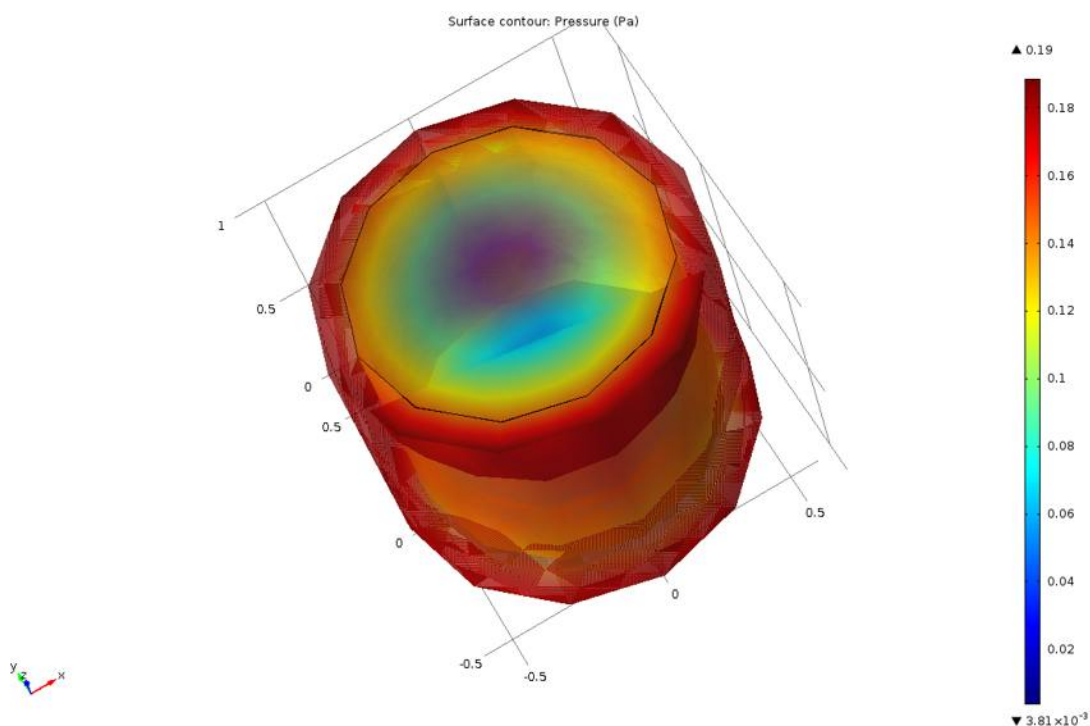


Рис. 3. Поле давлений потока в ортогональной системе координат

Выводы.

Таким образом, для решения поставленных задач при достижении результатов численного эксперимента с заданной степенью точности и обеспечением экономической эффективности синтезированной гидродинамической модели процесса концентрирования жидкого раствора необходимо реализовать

организационно-технические мероприятия, направленные на:

- адаптацию существующих алгоритмов и решений для распараллеливания вычислительных ресурсов в перспективной гибридной вычислительной системе, использующей как процессоры, так и видеокарты;

– разработку программной библиотеки данных из результатов решения трехмерных задач для гибридных невысоко производительных вычислительных систем, поддерживающей совместимость с форматом численных моделей, синтезированных в системе COMSOL.

Литература

1. Боровков, А. И. Компьютерный инжиниринг. Аналитический обзор / А. И. Боровков. – СПб., 2012.
2. Калинин, Е. Н. Тепловая и гидродинамическая мо-

дели процесса концентрирования технологического раствора в поле действия центробежных сил / Е. Н. Калинин, Е. Е. Корочкина, И. П. Горнаков // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2012. – №6. – С. 151–155.

3. Калинин Е. Н., Корочкина Е. Е., Горнаков И. П., Голованов Е. А. Устройство выпарное центробежного типа для концентрирования жидких растворов. Патент РФ на изобретение №2509591 С1 МПК В01Д.

4. Кочин, Н. Е. Теоретическая гидромеханика / Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, Н. В. Розе. – М., 1963. – Т. 2. – С. 387.

УДК 004.89, 519.2, 519.85

С. В. Ендияров
ОАО «Уралмашзавод» (г. Екатеринбург),
С. Ю. Петрушенко
НПО «Новатор» (г. Екатеринбург)

ПРОГРАММНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА УСРЕДНЕНИЯ ШИХТОВОГО СЫРЬЯ»

Представлена система мониторинга процесса усреднения шихтового сырья, которая реализована в виде программно-аналитического комплекса и может быть использована для повышения качества усреднения сыпучих материалов методом штабелирования.

Мониторинг, усреднение, 3D визуализация, моделирование, поддержка принятия решений, аномальная зона.

The article presents the information system for control and condition monitoring of iron ore blending process in a stock pile, which can be used to increase the quality of the end product.

Condition monitoring, blending, 3D visualization, modeling, decision support systems, anomalous zone.

Введение.

Чаще всего в производстве, связанном с использованием сырьевых материалов, используют склады, на которых наряду с хранением производят также усреднение их химического и гранулометрического состава. Усреднение химического состава поступающих на склад материалов происходит за счет того, что усредняемый материал при загрузке укладывается в штабель послойно, а при разгрузке отбирается из штабеля в разрез слоями.

Раздельная предварительная гомогенизация компонентов сырьевой смеси – основной метод усреднения сырья в цементной, угольной, металлургической и других видах промышленности. Отдельные компоненты после предварительной гомогенизации дозируются в соответствии с проектным химическим составом сырьевой смеси и подаются через питающие бункера и весовые ленточные дозаторы. Химический анализ сырьевой смеси, выходящей из усредненного штабеля, позволяет судить о необходимости корректирования ее состава [1].

Контролируемые параметры процесса усреднения характеризуются вектором большой размерности, что затрудняет обработку данных и как следствие повышает время на принятие решений оператором о

корректировке процесса. В связи с этим задача поддержания однородности химического состава усредняемой смеси является перспективной и требует комплексного подхода для ее решения. Особой сложностью решения данной задачи является своевременное обеспечение обработки информационных потоков в режиме реального времени и предоставление результатов оператору в виде, доступном для принятия решения [3].

Основная часть.

Разработанный программно-аналитический комплекс обеспечивает постоянный контроль процесса формирования штабеля шихтового сырья в виде трехмерного объемного отображения контуров штабеля, слежение за соответствием контролируемых параметров заданным, оперативное отслеживание изменения технологических ситуаций. Целью системы мониторинга является поддержание стабильного качества выходной продукции.

Формирование объемной модели штабеля шихты связано со значительными трудностями. Нарушение технологического режима процесса усреднения шихтового сырья приводит к изменению содержания компонентов сырья в штабеле и образованию участ-