

МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ ФОСФОЛИПИДНОЙ ЭМУЛЬСИИ В РОТАЦИОННО-ПЛЕНОЧНОМ АППАРАТЕ

Алтайулы С., канд. техн. наук, доцент

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

Посметьев В.В., канд. физ.-мат. наук, доцент

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

На основе метода конечных элементов разработана математическая модель процесса сушки фосфолипидной эмульсии в ротационно-пленочном аппарате. Исходная жидкость представляется в виде элементов-шаров трех типов ("вода", "масло", "фосфатиды"), взаимодействующих между собой и совершающих механическое движение внутри аппарата. Модель обладает высокой степенью адекватности, легко корректируется при изменении конструкции аппарата и гарантированно дает конечный результат.

On the basis of final element method the mathematical model of process of phospholipid emulsification drying in the rotational film device is developed. The liquid is represented in the form of elements-spheres of three types ("water", "oil", "phosphatides"), co-operating among themselves and making mechanical movement in the device. The model possesses high degree adequacy, is easily corrected at change of a design of the device and guaranteedly gives an end result.

Ключевые слова: фосфолипидная эмульсия, сушка, ротационно-пленочный аппарат, математическое моделирование, метод конечных элементов

При первичной очистке растительных масел одним из ценных побочных продуктов являются фосфолипидные концентраты. Они широко применяются в кондитерской, хлебопекарной, комбикормовой и других отраслях промышленности. Одним из наиболее ответственных и продолжительных этапов при производстве фосфолипидных концентратов является процесс сушки. Ранее предложена конструкция ротационно-пленочного аппарата, позволяющего обеспечить высокую эффективность процесса сушки фосфолипидной эмульсии [1]. Для оптимизации конструктивных параметров аппарата и режимов его эксплуатации целесообразно использовать математическое моделирование, позволяющее значительно снизить экономические затраты на этапе разработки, так как можно большую часть экспериментов с аппаратом заменить расчетами на компьютере.

В этой связи модель должна максимально точно воспроизводить происходящие в реальности процессы. Модель должна всесторонне охватывать весь спектр происходящих в аппарате явлений: механическое вращение ротора аппарата, ламинарное и турбулентное движение трехкомпонентной жидкости и пара, термодинамические явления, двухфазное состояние рабочей среды с возможностью исследовать переход от жидкости к газу, и наоборот. Кроме того, модель должна быть в высокой степени универсальной, так как на этапе конструирования, по мере проверки эффективности аппарата, может вноситься большое количество изменений в первоначальную конструкцию, и необходимо иметь возможность легко перестраивать модель.

Существующие к настоящему времени методы моделирования не позволяют решить эту задачу. Аналитические методы описания движения рабочей среды или массотеплообмена были применены только для ограниченного ряда простейших частных случаев. Для ротационно-пленочного аппарата в целом возникла бы необходимость в очень грубых допущениях, которые не позволили бы даже качественно, не говоря уже о количественных оценках, описать происходящие в аппарате процессы. Кроме того, в аналитических методах невозможно добиться универсальности модели, так как даже незначительные изменения конструкции приводят практически к необходимости построения новой модели: необходимо снова подбирать упрощающие предположения, симметрию задачи и методы решения.

Поэтому при выборе методики моделирования мы ориентировались на конечно-элементный подход, который, приобрел популярность в различных отраслях знаний [2]. В рамках этого подхода можно создавать модели в высокой степени адекватные, универсальные, быстро и безошибочно реализуемые, легко корректируемые и надежные (позволяющие со стопроцентной вероятностью пройти от начала расчета до конца расчета без "тупиков", частых для аналитических методов). В рамках метода конечных элементов сложная система разбивается на большое число однотипных подсистем, взаимодействующих между со-

бой. При этом сложность системы сводится к расчету кооперативных явлений взаимодействия элементов между собой [3].

Применительно к моделированию ротационно-пленочного аппарата мы считаем целесообразным разбить весь объем движущейся жидкости на большое количество (порядка 10^5) элементов-шаров трех типов (фосфатиды, масло, вода), представляющих собой элементы жидкости и взаимодействующих между собой. Шар с минимальным диаметром элементов, достаточно адекватно воспроизводятся происходящие процессы, и одновременно обеспечивается высокая скорость расчетов на компьютере. Шаровидная форма элементов принята, чтобы добиться изотропии свойств модельной жидкости. Основные свойства жидкости (тип, плотность, модуль упругости, теплопроводность, и др.) пересчитываются на один элемент жидкости.

Первым из наиболее важных рабочих процессов, которые необходимо воспроизвести в модели, является испарение воды из эмульсии. Испарение в модели воспроизводится постепенным удалением шаровых элементов воды из трехкомпонентной смеси элементов. Вторым по важности процессом является механическое движение эмульсии в аппарате, вызываемое вращающимся ротором. Для того, чтобы модель корректно воспроизводила указанные процессы, необходимо воспроизвести механическое движение шаровых элементов и задать их взаимодействие между собой и с рабочими поверхностями аппарата (ротором, стенками, подводными патрубками).

Состояние каждого элемента-шара i определяется шестью переменными: декартовыми координатами его центра (x_i, y_i, z_i) и декартовыми составляющими скорости (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) . Взаимодействие элементов между собой будем считать вязкоупругим, что позволяет адекватно учитывать возникновение упругости при сжатии жидкости и потери энергии при течении жидкости.

Расчет сил, действующих на элементы, производится следующим образом. Некоторый элемент i испытывает силовое воздействие со стороны каждого из окружающих его элементов j :

$$F_i = \sum_{j=1}^{N_{\text{Э}}} (F_{ij}^Y + F_{ij}^B), \quad (1)$$

где F_{ij}^Y и F_{ij}^B — силы упругого и вязкого взаимодействия элементов i и j ;

$N_{\text{Э}}$ — общее количество элементов в модели жидкости.

При расчете сил для каждой пары элементов предварительно вычисляется расстояние r_{ij} между их центрами $S_i(x_i, y_i, z_i)$ и $S_j(x_j, y_j, z_j)$:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}. \quad (2)$$

От способа задания силы между элементами $F_{ij}(r_{ij})$ зависят свойства жидкости или газа. В простейшем случае, можно считать взаимодействие упругим и подчиняющимся закону Гука (рис. 1). Этого достаточно для решения большинства задач о функционировании аппарата.

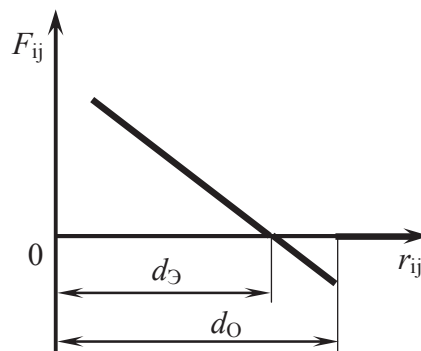


Рис. 1 - Зависимость модуля силы взаимодействия двух элементов i и j от расстояния r_{ij} между ними

При внедрении элементов друг в друга возникает возвращающая сила, пропорциональная величине их внедрения (ветвь графика при $0 < r_{ij} < d_{\text{Э}}$, где $d_{\text{Э}}$ — диаметр элемента). Для того, чтобы учесть склон-

ность элементов жидкости соединяться между собой и обеспечивать неразрывность объема жидкости, то же самое пропорциональное взаимодействие сохраняется и в диапазоне $d_{\text{э}} < r_{ij} < d_0$ (где d_0 — расстояние, при котором происходит отрыв элементов). При этом, попытка удалить элементы друг от друга также вызовет возвращающую силу, стремящуюся вернуть элементы в состояние касания. Таким образом, упругое взаимодействие подчиняется следующему закону.

$$\begin{aligned} F_{xij}^y &= \begin{cases} c(d_{\text{э}} - r_{ij})(x_i - x_j) / r_{ij}, & \text{если } r_{ij} < d_0; \\ 0, & \text{если } r_{ij} \geq d_0; \end{cases} \\ F_{yij}^y &= \begin{cases} c(d_{\text{э}} - r_{ij})(y_i - y_j) / r_{ij}, & \text{если } r_{ij} < d_0; \\ 0, & \text{если } r_{ij} \geq d_0; \end{cases} \\ F_{zij}^y &= \begin{cases} c(d_{\text{э}} - r_{ij})(z_i - z_j) / r_{ij}, & \text{если } r_{ij} < d_0; \\ 0, & \text{если } r_{ij} \geq d_0, \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

где F_{xij}^y и F_{yij}^y — декартовы составляющие силы F_{ij}^y ;
 c — коэффициент жесткости упругого взаимодействия элементов.

Для расчета F_{ij}^B выбрана общепринятая прямо-пропорциональная зависимость вязкой силы от скорости движущегося в среде тела, при этом введен дополнительный коэффициент $(r_{ij} - d_0)$, представляющий собой величину взаимного проникновения элементов друг в друга.

$$\begin{aligned} F_{xij}^B &= k(r_{ij} - d_0)(v_{xi} - v_{xj}); \\ F_{yij}^B &= k(r_{ij} - d_0)(v_{yi} - v_{yj}); \\ F_{zij}^B &= k(r_{ij} - d_0)(v_{zi} - v_{zj}). \end{aligned} \quad (4)$$

где k — коэффициент вязкости.

В зависимости от того, какая пара шаровых элементов взаимодействует (возможны шесть вариантов: "вода"-"вода", "вода"-"фосфатиды", и т.д.), в формулы (3) и (4) подставляют соответствующие коэффициенты жесткости и вязкости.

Движение элементов в рамках классической механики описывается дифференциальными уравнениями, составляемыми на основе второго закона Ньютона. Для i -го элемента можно записать

$$\begin{aligned} m_{\text{э}} \frac{d^2 x_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{\text{э}}} (F_{xij}^y + F_{xij}^B) + \sum_{j=1}^{N_{\text{п}}} F_{xij}^{\text{п}}; \\ m_{\text{э}} \frac{d^2 y_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{\text{э}}} (F_{yij}^y + F_{yij}^B) + \sum_{j=1}^{N_{\text{п}}} F_{yij}^{\text{п}}; \\ m_{\text{э}} \frac{d^2 z_i}{dt^2} &= \sum_{j=1}^{N_{\text{э}}} (F_{zij}^y + F_{zij}^B) + \sum_{j=1}^{N_{\text{п}}} F_{zij}^{\text{п}} - m_{\text{э}} g \end{aligned} \quad (5)$$

где $m_{\text{э}}$ — масса элемента;

t — время;

g — ускорение свободного падения;

$F_{ij}^{\text{п}}$ — силы, действующие со стороны j -го элемента рабочей поверхности аппарата на i -й элемент жидкости.

$N_{\text{п}}$ — количество рабочих поверхностей

Расчет сил взаимодействия элементов с рабочими поверхностями $F_{ij}^{\text{п}}$ производится по отдельному алгоритму, при этом учитывается геометрия поверхностей: цилиндрическая внутренняя поверхность корпуса и внешняя поверхность ротора, лопастей ротора, плоские поверхности передней стенки аппарата и сепарационного отбойника и т.п.

Необходимо отметить, что вращение шаровых элементов вокруг их центров в модели не учитывается, при этом практически не вносится погрешность, так как элементы образуют более крупные элементы жидкости (капли, слои). При движении таких крупных фрагментов учет их вращения происходит автоматически — движением элементов друг относительно друга.

Совокупность большого количества уравнений вида (5) для всех $N_{\text{э}}$ элементов описывают эволюцию

жидкости с течением времени. Положенную в основу модели система дифференциальных и алгебраических уравнений целесообразно решать численно усовершенствованным методом Эйлера-Коши с использованием ЭВМ [4]. Для удобства моделирования необходимо составить программу на удобном языке программирования сложных алгоритмов, в частности может быть использован язык Object Pascal среде Borland Delphi.

Выводы

Разработанная на основе метода конечных элементов математическая модель процесса сушки фосфолипидной эмульсии в ротационно-пленочном аппарате позволяет добиться высокой степени адекватности, легко корректируется в зависимости от проводимого теоретического исследования и гарантированно дает конечный результат при любой постановке задачи.

Литература

1. Алтайулы С. Разработка конструкции нового горизонтального ротационно-пленочного аппарата для сушки фосфатидных эмульсий подсолнечных масел // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: Материалы VII международной научно-практической конференции (17 ноября 2009 г.) / Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2009. – С. 252–257.
2. Деклу Ж. Метод конечных элементов. – М.: Мир, 1974. – 95 с.
3. Зенкевич О.С., Чанг И. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошной среды. – М.: Недра, 1974. – 238 с.
4. Инженерные расчеты на ЭВМ: Справочное пособие / Под ред. В.А. Троицкого. – Л.: Машиностроение, 1979. – 288 с.

УДК 621.926.4

РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В МЕЛЬНИЦЕ УДАРНО-ОТРАЖАТЕЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ

Опарин С.А. канд. техн. наук, доцент,
Лещенко Е.В. канд. техн. наук, ассистент,
Сорока П.И. д-р техн. наук, профессор

ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет»,
г.Днепропетровск

В статье приведены теоретические исследования по установлению взаимосвязи между технологическими параметрами процесса измельчения в мельнице ударно-отражательного действия. Установлены математические зависимости для расчета удельного расхода теплоты и температуры пылегазовой смеси на выходе из мельницы. Получены экспериментальные зависимости по влиянию технологических параметров на температуру пылегазовой смеси, подтверждающие результаты теоретических исследований.

In article theoretical researches on an establishment of interrelation between technological parameters of process of crushing in a mill of shock - reflective action are resulted. Mathematical dependences for calculation of the specific charge of heat and temperatures powder-gas mixes on an output from a mill are established. Experimental dependences on influence of technological parameters on temperature powder-gas the mixes confirming results of theoretical researches are received.

Ключевые слова: теплота измельчения, температура мельницы ударно-отражательного действия

Измельчение материалов в мельницах ударно-отражательного действия, особенно тонкого помола, сопровождается значительным тепловыделением [1]. Образование теплоты в рабочих зонах данного типа измельчителей обусловлено следующими факторами: трением воздуха и материала о рабочие элементы, турбулизации пылегазовой смеси, возникновением новых поверхностей при разрушении, многократным сжатием пылегазовой смеси и т.д. Чрезмерное повышение температуры при измельчении для многих материалов нежелательно, так как в некоторых случаях это приводит к ухудшению качества продукта, а также, приводит к созданию взрывоопасной обстановки.