

минимизировать значение целевой функции $Q(w, u, y)$ для ряда векторов возмущений w так, чтобы выполнялось соотношение:

$$Q^*(w, u^*, y) = \min_{u \in U} Q(w, u, y), \quad (1)$$

где Q — это целевая функция, y — вектор выходных параметров объекта, U — область допустимых значений для варьируемых переменных. При этом должны выполняться уравнения связи, характеризующие математические модели объектов:

$$y = \Psi(w, u, p) \quad (2)$$

и ограничения, накладываемые на независимые и выходные переменные:

$$\begin{aligned} R_1(w, u) &\geq 0 \\ &\vdots \\ R_k(w, u) &\geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} L_1(y) &\geq 0 \\ &\vdots \\ L_m(y) &\geq 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь p — вектор параметров математических моделей, Ψ , R , $i = 1, \dots, k$, L , $i = 1, \dots, m$ — операторы связи.

Математическая модель биореактора. Основными допущениями являются: отдельная секция — это емкость с промежуточным уровнем смешения, зависящим от скорости подачи газовой фазы; факторами, которые ограничивают скорость роста микроорганизмов, являются концентрация субстрата и концентрация кислорода; процесс изотермический; кинетика процесса соответствует зависимости Моно.

Математическая модель биореактора включает три основных модуля: кинетики, гидродинамики и массопередачи.

Уравнения математической модели образуют замкнутую систему и позволяют, задавшись количеством и концентрацией субстрата на входе в биореактор, рассчитать его выходные параметры.

Математическая модель термофлотатора. Основные допущения: термофлотатор можно представить в виде ячеечной модели; каждая ячейка представляет собой объект с сосредоточенными параметрами, то есть идеального смешения; основными компонентами газовой фазы пузырьков являются CO_2 , O_2 и N_2 ; формирование газовых пузырьков происходит в первой (нижней) секции; количество транспортируемого твердого вещества из секции с номером i в ячейку с номером $(i + 1)$ пропорционально количеству

эффективных пузырьков и концентрации суспензии ячейке с номером i , если $x_i < x^*$; и количество транспортируемого твёрдого вещества становится пропорциональным только количеству эффективных пузырьков лишь тогда, когда $x_i > x^*$; количество транспортируемого твёрдого вещества из ячейки с номером $(i+1)$ в ячейку с номером i пропорционально количеству пузырьков, потерявших способность к флотации в ячейке с номером $(i+1)$.

Математическая модель гранулятора. Основные допущения: отсутствует вынос сухого вещества с газовым потоком через верхнюю часть аппарата; идеальное смешение по поступающей суспензии и гранулам; вся суспензия попадает на гранулы, находящиеся в аппарате, этот процесс происходит мгновенно, суспензия распределяется по поверхности гранулы равномерно; сушка (испарение влаги и отвод её с воздушным потоком) происходит только с поверхности гранул; твёрдая (гранулы, ретур), жидкая (суспензия) и газовая фазы перемешаны в объёме в достаточной степени интенсивно — это создаёт эффект псевдооживления и даёт возможность применять даже к твёрдой фазе закономерности, характерные для жидкостей; гранула представляет собой двухслойную конструкцию: внутренний слой — это частица ретура, внешний — вновь попавшая на гранулу суспензия; слои имеют круглую форму и представляют собой объекты с сосредоточенными параметрами; после выгрузки такой частицы происходит усреднение температуры и влажности в ней.

В настоящее время математические модели биореактора, термофлотатора и гранулятора доведены до уровня работающих программ, написанных в системе программирования Delphi.

В результате предварительных расчетов получены следующие экономические показатели процесса (см. таблицу 1).

Таблица 1. Эксплуатационные затраты технологического процесса (ТП) за год (электроэнергия, тепловая энергия, топливо)

Вид ресурса	Затраты ресурса за 1 год эксплуатации ТП	Цена единицы ресурса	Цена ресурса за 1 год эксплуатации ТП, в руб.
Электроэнергия	213960 кВт.ч	2 руб./кВт.ч	427920
Тепловая энергия	180 Гкал	842,56 руб./Гкал	151660
Дизельное топливо	11,28 т	22300 руб./т	25944

В настоящее время данный проект проходит апробацию на ООО «Биохим» г. Рассказово Тамбовской области.