

---

## Использование методов математического моделирования для разработки малоотходной технологии в производстве этанола

Арзамасцев А. А., Азарова П. А.

Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина,

ул. Интернациональная 33, Тамбов, 392000, Россия

e-mail: arz\_sci@mail.ru, azarova\_pa@mail.ru

---

Разработка малоотходных производств является одним из важнейших направлений развития промышленности. Данная работа посвящена оптимизации (с использованием экономических критериев) реального технологического процесса выработки бактериальной биомассы из отходов производства этанола.

Поставленная цель требует решения следующих задач: осуществить математическую постановку задач оптимизации (при использовании в качестве критерия приведенных затрат, а в качестве ограничений — имеющихся экологических норм и правил); построить адекватные математические модели основных технологических единиц данного процесса, а также провести исследование режимов их работы и всего процесса в целом; решить поставленные задачи с использованием методов нелинейного программирования; выработать практические рекомендации и провести сравнение с известными аналогами.

Технологический процесс включает следующие основные единицы: многосекционный биохимический реактор, термофлотатор и сушилку-гранулятор.

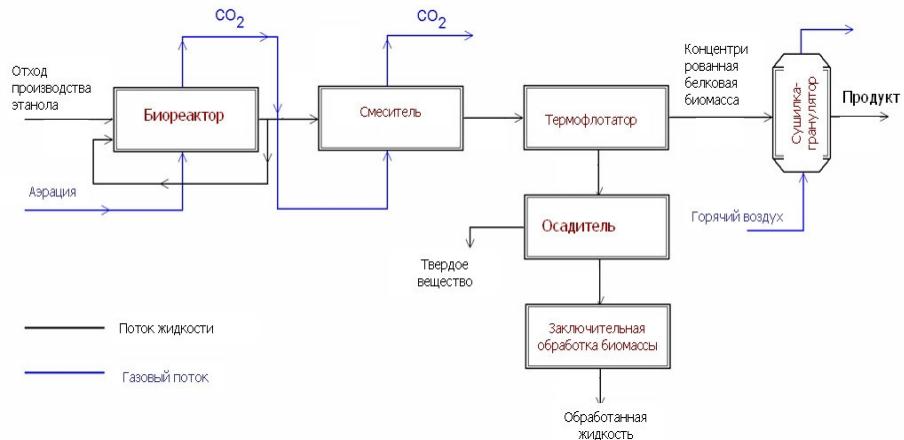


Рис. 1. Технологический процесс

Задача оптимизации может быть сформулирована следующим образом. Необходимо найти вектор варьируемых переменных  $u$ , который позволяет

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:

$$R_1(w, u) \geq 0 \quad (3)$$

$$\vdots \\ R_k(w, u) \geq 0 \quad (3)$$

$$L_1(y) \geq 0 \\ \vdots \\ L_m(y) \geq 0. \quad (4)$$

Здесь  $p$  — вектор параметров математических моделей,  $\Psi$ ,  $R$ ,  $i = 1,..,k$ ,  $L$ ,  $i = 1,..,m$  — 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 ячеекной 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 твёрдого 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), жидккая (суспензия) и газовая фазы перемешаны в объёме в достаточной степени интенсивно — это создаёт эффект псевдоожижения 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, теплоэнергия, 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
Теплоэнергия	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.