

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**
**ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ИРРИГАЦИИ
И МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

Ш. РАХМОНОВ

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМИ
ПРОТОЧНЫМИ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

МОНОГРАФИЯ

Ташкент 2019.

УДК:

ББК:

**Ш. РАХМОНОВ. Модели и алгоритмы управления непрерывными
проточными биотехнологическими процессами**

– Т.: , 2019, 123 с.

ISBN

В монографии рассматривается информационный материал состояния модели математического моделирования, оптимизации и управления биотехнологическими процессами, оптимизации технологического процесса культивирования хлореллы, разработки алгоритмов прогнозирования протекания технологического процесса.

В представленной монографии последовательно изложены анализ и состояние реализации разработанных моделей и алгоритмов в задачах управления процессом культивирования хлореллы.

Монография предназначена для магистрантов, специалистов и научных работников, занимающихся вопросами оптимального и эффективного управления технологических процессов культивирования микроорганизмов.

Ответственный редактор:

Доктор технических наук, профессор М.А.Исмаилов

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент

А.Ш. Арифжанов

Кандидат технических наук, доцент

А.С. Бердышев

ISBN

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение объема выпускаемой продукции и повышение её качества должны достигаться в основном за счет усовершенствования технологических процессов и внедрения высокоэффективных систем управления. Важнейшее значения эти вопросы имеют и для микробиологических производств, в частности, для производства хлореллы – важного питательного компонента кормов для животноводства. Однако отсутствие достоверной и исчерпывающей информации о свойствах и конкретных, специфических особенностях объекта управления, отображаемых в адекватных математических моделях, специализированных вычислительных устройств и соответствующих средств контроля не дает возможности со всей полнотой и эффективностью использовать весь мощный арсенал современных кибернетических методов управления. Между тем, применение современных методов моделирования и оптимального управления позволило бы учитывать все многообразие особенностей управляемых процессов и тенденций развития технологических решения по их аппаратному и схемному воплощению, что обеспечило бы научные основы для осуществления точного прогноза хода сложных процессов и явлений, происходящих в исследуемых объектах.

Разработка систем оптимального управления требует проведения комплексных исследований, направленных на построение адекватных математических моделей, необходимых для прогнозирования хода технологического процесса, выбор его оптимальных режимов и выработку на этой основе соответствующих управляющих воздействий, реализующих эффективные алгоритмы функционирования синтезированных систем управления.

Исходя из такой актуальной посылки, выполнена данная работа, посвященная разработке математической модели для целей оперативного прогнозирования и управления биотехнологическими процессами на примере культивирования микроводорослей.

Цель данной работы заключается в исследовании и разработке методов и практических примеров составления прогнозирующих моделей и синтеза систем управления технологическими процессами выращивания микроводорослей.

Такая постановка цели обусловила необходимость решения следующих недостаточно изученных и проработанных конкретных задач исследования:

1) Изучение и анализ специфических особенностей производства микроводорослей как объекта математического моделирования и автоматического управления.

2) Разработка математической модели процесса культивирования микроводорослей с учетом кинетических, гидродинамических и ряда других физико – химических и биотехнологических особенностей промышленного производства хлореллы.

3) Выявление основных факторов, оказывающих существенное влияние на ход процесса, и реализация процедур параметрической идентификации модели.

4) Разработка алгоритмов оперативного прогнозирования и адаптивного управления процессом культивирования хлореллы.

5) Обоснование и выбор критериев эффективности и методов оптимизации и их программно – алгоритмическая реализация.

6) Обоснование функционально – алгоритмической структуры системы управления и выбор технических средств для ее практической реализации.

7) Реализация полученных результатов и выработка конструктивных рекомендаций по оптимальному управлению объектом исследования.

Для решения поставленных в реферируемой работе задач исследования использованы методы и принципы математического моделирования сложных химико – технологических процессов и систем, теории оптимизации, вычислительной математики, теории синтеза оптимальных систем управления, а также натурального эксперимента.

Исследование базируется на разработке и доведение до практического использования методологии и информационно-логически взаимосвязанного комплекса методов, моделей, вычислительных алгоритмов и программ на основе теории алгоритмизации, позволяющих осуществлять оперативный анализ эксплуатации культиваторов хлореллы, применять наиболее достоверные решения по реализации управляющих воздействий.

Данная работы заключается в следующем:

- на основе результатов исследования специфических особенностей производства микроводорослей как объекта математического моделирования и автоматического управления, а также анализа их физико-химических и биотехнологических закономерностей выявлены основные Факторы, влияющие на ход процесса, определены конкретные виды превращений питательных компонентов и вскрыты основополагающие закономерности роста микроводорослей, а также выделены специфические особенности и характеристики эксплуатации промышленных культиваторов хлореллы как многостадийных объектов моделирования и управления;

- предложена математическая модель кинетики роста микроводорослей, отражающая различные виды превращений с учетом влияющих факторов;

- исследованы реальные гидродинамические режимы протекания процесса и выявлена структура взаимодействующих потоков в культиваторе (ферментере);

- разработана обобщенная математическая модель процесса культивирования микроводорослей, адекватно отражающая основные физико-химические и биотехнологические явления и эффекты и позволяющая осуществлять надежный и оперативный прогноз производственных ситуаций;

- сформулирована задача оптимального управления технологическим процессом культивирования микроводорослей, обоснованы критерии эффективности и выбраны методы оптимизации;

- предложена функционально-алгоритмическая структура системы управления и разработан пакет прикладных программ, реализующих предложенные модели и алгоритмы управления.

Достоверность сформулированных в монографии научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается согласованностью

результатов теоретических и экспериментальных исследований, выполненных с использованием современных методов и средств, а также положительными итогами промышленных испытаний.

Разработанные модели, алгоритмы управления, программно-технические средства и система управления процессом роста микроводорослей с гибкой конфигурацией, позволяют с достаточной степенью точности прогнозировать производственные ситуации и технологические условия, оптимизировать режимы ведения процесса, повысить точность контроля и управления. Предложенное и обоснованное многократное использование посевных культур обеспечивает возможность повышения качества и увеличения выпуска целевой продукции при одновременном уменьшении потребляемых питательных веществ и энергетических ресурсов, снизить потери и повысить культуру обслуживания и сократить численность обслуживающего персонала.

В написании и публикацию данной работы хочу выразить благодарность главному научному сотруднику лаборатории «Интеллектуальных систем управления» при ТУИТ профессору М.А. Исмаилову, а также заведующей кафедрой АУТПШ профессору Р.Т. Газиевой.

Глава I. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОГО СИНТЕЗА.

Применение принципов математического моделирования и управление технологическими процессами микробиологического синтеза в задачах алгоритмизации.

Совершенствование систем и методов управления технологическими процессами (в частности, микробиологического синтеза) на основе применения математических методов и средств вычислительной техники – одно из главных направлений научно-технического прогресса, один из наиболее эффективных путей повышения производительности труда в промышленных отраслях народного хозяйства (1-9). Эффективное управление производственными процессами позволяет избежать потерь, экономить сырье, повышать производительность машин и оборудования.

Первый этап управлений технологическими процессами с помощью ЭВМ – локальная автоматизация объектов управления. Применительно к технологическим процессам, она сводится к выбору или созданию специфических датчиков контрольно-измерительных приборов, разработки и внедрению, локальных систем регулирования основных технологических параметров процесса. При автоматизации микробиологического синтеза на сегодняшний день реализованы следующие системы автоматического регулирования: расходы суслу, расходы питательных солей, подача углекислого газа (CO_2), уровня суслу в реакторах, уровня освещенности, равномерности распределения питательных веществ и т.д. (10).

От задач частичной автоматизации совершается переход к задачам комплексной автоматизации всего технологического комплекса. Для этого необходимо разработать методы и средства контроля, специфические для микробиологической промышленности (14,15,16), системы оптимального управления производством с применением вычислительной техники, создать математические модели, отображающие кинетику, гидродинамику, массо- и теплообмена в процессе биосинтеза, разработать и внедрить на действующих производствах системы оптимального управления (СОУ) (19) и т.д.

При обосновании пути реализации систем оптимального управления технологическими процессами микробиологического синтеза применяются известные методы технической кибернетики. В первую очередь строится математическая модель, которая должна адекватно отображать наиболее устойчивые соотношения между технологическими факторами и технико-экономическими показателями процесса (20,21).

Возможны два основных подхода к созданию математических моделей процессов микробиологического синтеза: создание экспериментально-статистических моделей процессов с применением методов пассивного и активного экспериментов (22,23) и создание экспериментально-аналитических моделей, путем составления уравнений, описывающих статистику и динамику процесса на микро- и макрокинетических уровнях иерархии.

Для установления основных закономерностей путем применения аналитического метода моделирования, необходимо изучать кинетические закономерности и скорости химических реакций, а также гидродинамические особенности физических процессов, сопровождающих химическое превращение (24,25,26).

Теория непрерывного культивирования и микроорганизмов позволяют определять общие закономерности о кинематике процессов биосинтеза в проточных аппаратах. Основы этой теории заложены *Monod. J.* (50), *Novick. A., Szillardl.* (51), и развиты И.И. Гительзоном, Б.Г. Ковровым, Е.Т. Тересковым (40), Н.Д. Иерусалимским (41), Н.Н. Нероновой (42), Ю.Л. Гуревичем, В.Г. Ковровым (43), Н.В. Степановым, Ю.М. Романовским (44) и др. (61,62,63,65)

Рассмотрим вопросы, касающихся микробиологического синтеза, следует подчеркнуть, то именно кинетика играет определенную роль в регулировании процессов в организованных биологических системах. Эти

процессы протекают в них с определенной скоростью и в определенной последовательности.

В такой постановке проблема анализа кинетического поведения сложной системы сводится к построению и исследованию математической модели (ММ), в которой скорости изменения концентраций различных составных компонентов были выражены через скорости отдельных элементарных реакций, принимающих участие в их образовании и использовании.

Допустим, что в нашей системе имеется n количество компонентов, которые для определенности будем считать химическими соединениями, претерпевающими метаболические превращения.

Каждое i -ое соединение из общего числа характеризуется значением концентрации C_i ($i = 1, 2, \dots, n$), которое может изменяться со временем $C_i(t)$, в результате взаимодействия i -ого соединения с любым из остальных $(n-1)$ веществ.

Такого предположения достаточно, чтобы можно было составить соответствующую данной ситуации общую ММ, которая представляет собой следующую систему из n дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dt} = f_1(C_1, C_2, \dots, C_n); \\ \frac{dC_i}{dt} = f_i(C_1, C_2, \dots, C_n), \end{cases} \quad (1.1)$$

где $C_1(t), C_2(t), \dots, C_n(t)$ – неизвестные функции от времени,

$\frac{dC_i(t)}{dt}$ ($i = \overline{1, n}$) – скорость изменения концентрации i -го вещества.

В модели (1.1) число уравнений n равно числу переменных (C_1, C_2, \dots, C_n) , изменяющихся в результате взаимодействия веществ.

Каждая из функций $f_i(C_1, C_2, \dots, C_n)$ есть функция аргументов C_1, C_2, \dots, C_n , зависящих от времени она представляет собой алгебраическую сумму

скоростей отдельных реакций образования и превращения q -овещества в системе.

Важно отметить, что уравнения вида (1.1) могут применяться не только для описания ферментативных каталитических процессов, но и для исследования других систем.

Так, если речь идет о математическом моделировании процесса микробиологического синтеза, то под «концентрацией» можно понимать количество клеток микроорганизмов в единице объема, содержание питательных веществ в среде.

Модель (1.1) имеет достаточно общий вид, и важно только, чтобы составленные уравнения правильно отражали характер протекающих процессов, или, иными словами, чтобы структура уравнений соответствовала динамической архитектоники исследуемой системы.

Обратимся к общему вопросу о том, какие же сведения о свойствах биотехнологической системы может дать анализ модели (1.1).

Самый простой и исчерпывающий ответ на этот вопрос заключается в том, что все необходимые сведения можно получить, решив систему дифференциальных уравнений (1.1), то есть найдя в явном виде зависимость от времени переменных

$$C_1(t), C_2(t), \dots, C_n(t).$$

В самом деле, задав некоторые начальные условия при $t_0 = 0$ и зная характер изменения во времени искомым функций, можно предсказать, какие значения примут переменные концентрации C_1, \dots, C_n в момент времени t .

Однако на самом деле в реальных системах в целом ряде случаев ситуация складывается значительно сложнее. Реальные биотехнологические системы (такие, как метаболические процессы в живой клетке) включают в себя огромное количество реакций, в которых участвуют тысячи веществ. Даже отобрав, наиболее существенные по своей биологической значимости, мы все

равно получили бы ММ, состоящую из десятков уравнений, в том числе нелинейных. В этих условиях практически нет никакой надежды найти их точные аналитические решения. В данном случае способны помочь и мощные вычислительные методы, которые с помощью ЭВМ позволяют получать значения функций $C_1(t)$, $C_2(t)$, ..., $C_n(t)$ в любой момент времени при заданных параметрах объекта и известных начальных условиях.

Отсюда следует вывод, что динамические ММ типа (1.1) могут быть полезны, если имеются:

1. Объектные методы существенного упрощения и уменьшения размерности исходной полной системы уравнений

2. Методы анализа дифференциальных уравнений, которые позволяют выявлять какие-либо важные общие динамические свойства объекта, не прибегая к нахождению в явном виде неизвестных функций.

Анализ литературных данных показывает, что построение ММ процесса – сложная, трудоемкая, требующая значительных затрат времени и средств щалач. Известные работы, посвященные проблеме автоматизации построения математических моделей технологических процессов, как правило, носят слишком общий характер, что делает применения описанных методов при моделировании конкретных юиотехнологических процессов весьма затруднительным. (70,71)

Основные идеи теории и практики управляемого культивирования микроорганизмов сформулированы Н.Д. Иерусалиским (72). ММ как составные блоки глобальной оптимизационной модели микробиологического процесса могут быть эффективно использованы в режиме “On-line” в том числе с учетом адаптации констант модели (3,5,10).

Рассмотрим ситуацию, когда обобщенная модель процесса накопления биомассы микробной популяции представлена одним блоком и когда

содержание ключевого фермента в единице биомассы неизменно. В этих случаях модель имеет следующий вид (11,27,40,44):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \mu(S)x; \\ \frac{dS}{dt} = \alpha\mu(S)x + U(t), \end{cases} \quad (1.2)$$

где: $U(t)$ – скорость подпитки субстратом,

x, S – скорость биомассы и лимитирующего субстрата;

$\mu(S)$ – функция Моно; α – кинетическая константа.

В этом случае, когда решается задача поиска оптимального режима дробных добавок лимитирующего субстрата, система (1.2) примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \mu(S)x; \\ \frac{dS}{dt} = -\alpha\mu(S)x + U(t). \end{cases} \quad (1.3)$$

Пусть задача оптимального управления формулируется следующим образом: необходимо найти такую программу подачи субстрата S и ферментер, которая к заданному моменту времени обеспечила бы максимальное накопления биомассы.

Математически задача оптимального управления формализуется следующим образом:

$$R = x(T) \rightarrow \max_{u(t)}\{x(t)\};$$

$$0 \leq U(t) \leq U_{max};$$

$$X(0) = X_0; S(0) = S_0,$$

где T – заданная длительность процесса ферментации; U_{max} – максимально допустимая скорость подпитки субстратом, R - критерий оптимальности (или целевая функция).

Аналитическое решение задачи оптимального управления возможно лишь в частных случаях. Поэтому даже для самых простых зависимостей удельной скорости роста от концентрации лимитирующего рост микроводорослей субстрата $\mu(S)$ приходится прибегать к помощи ЭВМ и численных методов вычислительной математики.

Обычными методами решения задач оптимального управления являются методы, при которых, меняя управляющий параметр $U(t)$ вычисляют значения критерия оптимальности, не прибегая к вычислению вспомогательных переменных и выбирая такую программу подпитки $U(t)$, которая обеспечивала бы экстремум к функционалу (1.4) (21,13). Однако как прямые, так и не прямые методы максимизации функционала (1.4) требуют достаточно длительного машинного времени. При этом процедурам поиска оптимального управляющего воздействия предшествует еще более длительная и трудоемкая процедура идентификации параметров математической модели (1.3).

Имея в виду уравнение Моно, допустим, что функция описывается следующим выражением:

$$\mu(S) = A_1 \frac{S}{S + A_2} * \frac{A_3}{S + A_3},$$

где A_1, A_2, A_3 – параметры модели,

S – концентрация лимитирующего субстрата

Функцию $\mu(S)$ в виде (1.5) подставляем в (1.3) и получим ММ в следующем развернутом виде:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = A_1 \frac{S}{S + A_2} * \frac{A_3}{S + A_3}; \\ \frac{dS}{dt} = -\frac{1}{y} A_1 \frac{S}{S + A_2} * \frac{A_3}{S + A_3} * X * U(t). \end{cases}$$

Задачи идентификации математической модели в данном случае заключается в том, чтобы по имеющимся экспериментальным данным наилучшим образом определить ее параметры. Показателем качества выполненной таким образом параметрической идентификации служит функция невязки, характеризующая методы отклонения теоретических данных от экспериментальных. Такой мерой отклонения может быть, например, функция:

$$q(A_1, A_2, A_3, Y) = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - X_i^{эк})}{N-m} \rightarrow \min A_1; A_2; A_3; Y \quad (1.7)$$

где A_1, A_2, A_3, Y – параметры математической модели (1.5) или (1.6); $X_i, X_i^{эк}$ – соответственно теоретические и экспериментальные значения концентрации биомассы; W_i - весовые коэффициенты; N – число экспериментальных точек; m – число оцениваемых параметров (в данном случае $m=4$).

При решении задачи минимизации функции невязки теоретические значения концентрации биомассы Y_i получают путем численного интегрирования системы при начальных условиях (1.4).

Традиционная математическая модель с параметрами , полученная в результате минимизации функционала, описывает процесс накопления биомассы «в среднем». Соответственно эффект от оптимального управления проявляется также «в среднем».

Для оптимального управления в реальном масштабе времени необходимо решить задачу минимизации функционала в темпе поступления информации $X_i^{эк}$ по ходу текущей ферментации.

В работе (52) описано решение задачи оптимизации культивирования, которая осуществлена путем комбинирования периодического, полупериодического и непрерывного способов получения продукта метаболизма. Задача поиска оптимального, с точки зрения, производительности процесса

решалась с помощью преобразования Келли и на основе принципа максимума Понтрягина. Преобразование Келли позволяет избежать ситуации, когда принцип максимума становится бесполезным.

В работах (14,15,16) задачу оптимального управления сводят при помощи градиентных методов спуска к вариационной задаче.

В работах Ю.П. Камарова и Г.А. Угодчикова (2,3,10) для решения задач оптимального управления трактуются применения принципов максимума Понтрягина и метода численного приближения Д.Е. Левишаускас и Н.Н. Васильева (4,7,8,9) предлагают для решения этих задач метод, основанный на применении теоремы Грина, и намечают путь каким можно найти так называемое особое управление (такое управление, которое нельзя получить с помощью собственно принципа максимума).

На приведенных данных видно, что различные методы математической теории оптимального управления находят широкое применение для целей интенсификации процессов культивирования микроорганизмов. Реализация таких задач может быть осуществлена с помощью современных быстродействующих электронно-вычислительных машин. Следует особо отметить, что для описания математических процессов биологических процессов часто используют математические модели, приводящие к большому числу управлений. Подобное особо характерно для сложных физиологических процессов. Аналитические решения таких математических моделей невозможно из-за громоздкости. Решения даже на современных ЭВМ задач оптимального управления сложными динамическими системами с помощью методов прямого поиска или с привлечением принципа максимума затруднительно. В этой ситуации будет конструктивна имитационная оптимизация (21,3,9), в ходе которой исследователь задает конкретный вид управляющих воздействий и реализует так называемые «машинный эксперимент». Интегрируя системы дифференциальных управлений с

заданными управляющими параметрами, исследователь минимизирует обоснованный функционал.

Решение задачи оптимального управления в такой постановке позволяет более эффективно использовать ЭВМ и сократить машинное время. Кроме того, надо иметь в виду, что в ряде случаев реальный эксперимент (например, в опытно-промышленных условиях) затруднен или невозможен, поскольку требует значительных непроизводительных затрат. Таким образом, имитационная оптимизация – эффективное средство поиска оптимальных управляющих воздействий на сложные динамические процессы (к таковым относятся и физиологические процессы, протекающие в микробных популяциях).

Первым опытом разработки автоматизированных биотехнологических систем (10) было создание лабораторной установки для периодического и непрерывного культивирования аэробных и анаэробных культур микроорганизмов «Фермус – 1». В этой системе реализовано два уровня автоматизированного управления. Система обладает законченной блочно-модельной структурой, ориентирована на реализацию управляемого культивирования микроорганизмов в режимах хемостата и трубостата.

С целью расширения функциональных возможностей системы «Фермус-1» была создана система «Каскад» (2,3,10). Комбинация трех установок типа «Фермус-1» позволяет решать такие задачи практической микробиологии, как изучение микробных сообществ, применяемых, в частности, для биологической очистки сточных вод, а также исследование многостадийных процессов микробиологического синтеза (3,4,10).

Следующий этап в развитии автоматизированных биотехнологических систем явилось создание в НИИ «Синтез белок» (г.Москва) информационно – вычислительных комплексов «Протва – ЭВМ» (для управления

промышленными биотехнологическими процессами) и другие из этой серии (10).

Функционально наиболее полной автоматизированной биотехнологической системой является система «Атмосферы – 1», включающая все уровни общей структуры автоматизированных биотехнологических систем. Эта система обеспечена набором дополнительных измерительных модулей и выполнена на базе микро-ЭВМ, и мини-ЭВМ. Результаты продолжения и развития этих исследований с оригинальным технологическим решением приведены в работе (10).

Анализ современного состояния технологии автоматизированного микробиологического производства (например, близких к производству микроводорослей), его прогнозирования и управления свидетельствует, что к настоящему времени недостаточно разработаны аналитические модели, позволяющие учитывать физико-химические и биологические закономерности исследуемых явлений. Это, по-видимому, объясняется малой изученностью специфических особенностей биохимических производств, разнообразием множеством факторов, влияющих на процесс, недостатком достоверной информации о кинетике, реальной гидродинамике процесса и закономерностях тепло- и масса обмена в объектах исследования (18,19). Следует также подчеркнуть, что пока не устоялись и общие взгляды на взаимосвязь биологических закономерностей, обусловленных скоростью размножения микроорганизмов.

Таким образом, в области прогнозирования и управления технологическими процессами микробиологического синтеза сохраняют свою актуальность сложные научно-технические задачи разработки таких математических моделей, которые учитывали бы, основные технологические и микробиологические особенности процесса. Для этого целесообразно использовать методы технической кибернетики, в частности, методы

математического моделирования и оптимального управления технологическими процессами с применением средств вычислительной техники.

Особенности производства микроводорослей как объектов математического моделирования и автоматического управления.

Протококковые водоросли – один из источников ценных витаминов. Многими исследователями установлено положительное влияние биомассы хлореллы и сценедесмуса как поливитаминных добавок в рацион сельскохозяйственных животных и птиц (53,54,55).

Молодые клетки водорослей отличаются более высоким содержанием витаминов, нежели старые. Содержание витаминов в водорослях увеличивается до конца недели культивирования, а затем постепенно снижается.

По содержанию каротина водоросли превосходят все известные растительные корма. В водорослях содержится значительное количество токоферола, рибофлавина и никотиновой кислоты. Водоросли содержат столько же тиамин и предоксина: сколько кукуруза, ячмень, джугара и овес. Эффективность биосинтеза витамина зависит от вида и штамма водорослей, а также от способа культивирования.

При батарейном способе культивирования каротин в биомассе удерживается на высоком уровне более стабильно, нежели при накопительном в гомогенно-непрерывном способах.

Биомасса водорослей, выращенная на минерально-органической и собственно органической среде, по содержанию витаминов мало отличается от биомассы, полученной на минеральной среде.

При массовом культивировании хлореллы и сценедесмуса с использованием импульсного концентрированного солнечного света наблюдается увеличение каротина почти 2-2,5 раза по сравнению с контролем. Хлорелла и сценедесмус – наиболее богатые источники каротина среди зеленых растений. По содержанию каротина они в 7-10 раз превосходят сухие абрикосы и шиповник и почти в 40 раз – сухие соевые бобы (81,82,83).

В хлорелле и сценедесмусе найдены такие витамины В₁, В₂, В₆, РР, С и другие, имеющие важное физиологическое значение для организма человека и животных.

Водоросли – мощный аккумулятор растворимых в воде солей. В биомассе хлореллы и сценедесмуса содержится значительное количество магния, калия, натрия, кальция, фосфора, а также микроэлементов – молибдена, бора, кобальта, никеля и др. (55).

Установлено, что белки хлореллы и сценедесмуса усваиваются организмом животных на 60-80%. По питательной ценности белки протококковых водорослей гораздо полезней, чем белки многих бобовых растений. В связи с высоким содержанием питательных веществ биомасса хлореллы и сценедесмуса отличаются довольно высокой калорийностью.

Протококковые водоросли являются мощными фотосинтетическими реакторами. Культура протококковых водорослей усваивает от 3% до 7% солнечной энергии, тогда как наземные растения поглощают ее не более 1%. Кроме того, коэффициент усвоения водорослями углекислого газа также довольно высок.

Водоросли, постоянно находясь в водной среде и получая питательные вещества в достаточном количестве способны синтезировать в своем организме в этой среде ценные биохимические компоненты.

Влияние физико-химических и других факторов на рост и развитие микроводорослей в культуре.

Актуальность исследования минерального питания микроводорослей обусловлена перспективностью интенсивного их культивирования в целях получения биомассы, богатой белками, незаменимыми аминокислотами и комплексом витаминов, а также отдельных метаболитов, лечебных препаратов и т.д. Так, биомасса хлореллы и других микроводорослей рассматривается как ценная добавка в корм животных, мальков рыб и др.

Питательные среды.

Рост и развитие водорослей в культуре, прежде всего, зависят от состава и концентрации питательных сред. В массовой культуре хлореллы и сценедесмуса обычно применяются те же соли, что и для выращивания высших растений. Протококковые водоросли (в отличие от высших растений) способны расти в широких пределах концентраций солей в питательном растворе. По данным М.Майера (1953), двадцатикратное повышение солей KNO_3 , KH_2PO_4 , $MgSO_4$ (от 0,001 до 0,2 г/л) в питательной среде не оказывает качественного влияния на скорость роста хлореллы. Высокий урожай хлореллы получается даже при общей концентрации солей в растворе до 0,063 г/л. Основное биохимическое свойство микроводорослей – их быстрая приспособляемость к различным концентрациям в солей в питательном растворе (55).

При культивировании водорослей применяют различные питательные растворы: среда Тамийя, среда 04, среда Майераса, среда ленинградская, раствор микроэлементов и др.

Для культивирования водорослей большое значение имеет состав и количество микроэлементов. Получение высокого и стабильного урожая микроводорослей большую роль играет концентрация и форма азота в

фоновой среде. В установках с хорошим перемешиванием суспензии при высокой концентрации азота в питательной среде (86-180 мг/л) можно повысить урожайность хлореллы до 2-2,5 г/л

Снабжение культуры углекислым газом.

Высокий урожай водорослей можно получить, если снабжать культуру достаточным количеством углекислого газа.

Как уже отмечалось, из-за плохой диффузии CO_2 в водной среде многие специалисты при массовом выращивании водорослей прибегают к обогащению культуры углекислым газом

Один из путей уменьшения себестоимости получаемой в ходе производственного способа культивирования микроводорослей биомассы – использование продуктов сгорания природного газа в промышленных котельных как источник тепла и углекислого газа.

Светоимпульсная стимуляция продуктивности протококковых водорослей.

В последние годы возникло новое направление в биотехнологии – светоимпульсное облучение растений концентрированным солнечным светом. Это обусловлено тем, что действие импульсного концентрированного солнечного света (ИКСС) стимулирует рост и развитие, повышает урожайность растений. Под воздействием ИКСС продуктивность хлореллы и сценедесмуса повышается в среднем на 25%-35%.

Качество посевного материала и его влияние на продуктивность водорослей в культуре.

Качество посевного материала – один из определяющих факторов урожайности водорослей в культуре (89).

Посевной материал должен состоять из однородных, молодых и жизненно активных клеток, способных к интенсивному росту и размножению в культуре.

Постоянно обеспечить крупные производственные установки качественным посевным материалом довольно трудно. Поэтому в условиях производственной культуры в качестве посевного материала часто используется часть суспензии, оставленная на дне тиваторов при сьеме урожая.

Влияние способа перемешивания культуры на рост и продуктивность водорослей.

Одно из необходимых условий массового культивирования микроводорослей – перемешивания их суспензии в бассейнах, что способствует улучшению условий освещенности, вариации и равномерному распределению питательных элементов во всей массе культуры. Кроме того, исключается групповое осаждение клеток на дно бассейнов (90,91).

В современных установках массового культивирования водорослей, перемешивание из суспензий, осуществляется при помощи пропеллеров, лопастных мешалок, а также путем барботирования суспензии воздухом, обогащенным углекислотой.

Выращивание суспензий хлореллы с исходной плотностью $3 \div 4$ млн клеток в 1 мл. суспензии до товарной плотности $30 \div 40$ млн. клеток в 1 мл. осуществляют в специальных установках.

В очищенный и продезинфицированный культиватор забивается одновременно горячая и холодная вода питьевого качества в пропорции, обеспечивающая температуру заливаемого объема (10 м^3) в пределах $20\text{-}30^\circ\text{C}$. В подогретую воду вводятся питательная среда, заблаговременно приготовленная в лаборатории.

В приготовленную питательную среду вносится исходная культура хлореллы, взятая из действующего культиватора, или паста, полученная путем сепарирования или центрифугирования хлореллы, в качестве,

обеспечивающем исходную плотность $3 \div 4$ млн. клеток на 1 мл. суспензии. После этого включается насос перемешивания суспензии в культиваторе, который создает направленный кольцевой поток суспензии со скоростью $0,5 \div 0,7$ м/с, кроме того перемешивается слой потока по всей высоте.

Во всасывающей патрубке насоса в количестве 7:10 л/мин подается углекислый газ, необходимый для нормального роста и развития клеток хлореллы. Регулирование подачи газа осуществляется системой подачи углекислого газа.

Перемешивание суспензии обеспечивает равномерное распределение питательных веществ, углекислого газа и культуры хлореллы по всему объему аппарата, а так же равномерное освещение клеток хлореллы солнечным или искусственным светом в пределах 15-70 тыс. люкс. (94). Воздух в помещении культиваторный, должен соответствовать санитарным нормам.

В связи с непрерывным характером производства установка рассчитывается на круглосуточную работу. В светлое время суток или при искусственном освещении (12-16 ч.) происходит рост клеток, а в темное время – деление клеток. При этом не требуется специального ухода и наблюдения.

Готовая суспензия насосами откачивается из культиваторов для перемешивания и подается в емкости для перевозки в склад и на дальнейшую переработку.

Обоснование цели и постановки задач исследования.

Разработка и синтез систем управления технологическим процессом культивирования микроводорослей выдвигает ряд вопросов, которые не могут быть решены на основе традиционных методов. Это связано в основном со сложностью и специфическими особенностями управляемого объекта, отсутствием стандартных технических средств контроля и управления, а также с некоторыми трудностями, связанными со структурной и технической реализацией предлагаемых систем. Проведенные исследования, посвященные изучению особенностей рассматриваемых объектов управления, показали, что методы синтеза систем управления еще недостаточно разработаны.

Разработанные и предложенные до настоящего времени математические модели требуют совершенствования, отсутствуют в достаточной степени прогнозирующей информации о функционировании систем, способных вырабатывать оптимальные управленческие решения по ведению процесса. Кроме того, отсутствует унифицированная и совершенная система оптимального управления, отвечающая современным жестким требованиям научно-технического прогресса.

Теоретические и практические запросы в реализации эффективных систем управления рассматриваемым классом технологических процессов выдвигают в качестве одной из первоочередных задач математического моделирования объекта исследования. В теории и практике математического моделирования и автоматического управления микробиологическими системами в основном получили развитие методы, в основу которых положены общеизвестные моно модели. Все теоретические и практические исследования были в основном направлены на изучение внутреннего механизма микробиологического синтеза, т.е. исследовались различные виды превращений субстратов и образование культур в чистой среде. К настоящему времени эти результаты достигли известного совершенства и изящества.

Однако здесь необходимо отметить, что особую насущность в настоящее время приобрели результаты работ в области математического описания механизма субстрат-ферментного комплекса исследования устойчивости, а также посвященных созданию автоматизированных ферментеров со встроенной мини- и микропроцессорной техникой.

Если до настоящего времени известные математические модели позволяли в какой-то мере решать задачи направленные на управление процессом культивирования микроводорослей в лабораторных условиях, а также оптимизировать совместные режимы культивирования и выбирать оптимальный состав питательных веществ, то целей оперативного прогнозирования и автоматического управления процессом культивирования в производственных условиях, они не в состоянии быть в достаточной степени

работоспособными. Это объясняется тем, что в естественных, природных или производственных условиях на ход процесса влияет целый ряд неконтролируемых факторов, что чрезвычайно затрудняет задачу надежного прогнозирования. Поэтому необходимо тщательно проанализировать особенности объекта управления, проранжировать и выделить группы влияющих факторов, разработать модели прогнозирования и алгоритмы управления ходом микробиологического синтеза.

В этой связи необходимы дальнейшие исследования, направленные на обоснованный синтез оптимальных систем управления. С этой целью необходимо моделировать производственный процесс культивирования хлореллы с учетом физико-химических и биологических особенностей субстрата, гидродинамических режимов, тепло- и масса обмена и ряда других факторов.

Цель настоящей работы, заключается в исследовании и разработки методов и практических приемов составления прогнозирующих моделей синтеза на их основе эффективных и работоспособных систем управления производственными процессами, массового культивирования микроводорослей.

Эти цели обусловили необходимость решения следующих недостаточно изученных и проработанных задач исследования:

1. Системный анализ специфических особенностей и производства микроводорослей как объекта математического моделирования и автоматического управления.

2. Разработка адекватных математических моделей процесса культивирования микроводорослей, достаточно полно учитывающих основные кинетические, гидродинамические и другие физико-химические и биологические объекты исследования

3. Выявление основных факторов на ход процесса и реализация процедур параметрической идентификации предложенной модели.

4. Разработка алгоритмов оперативного прогнозирования и автоматического управления процессов культивирования хлореллы.

5. Выбор критерия эффективности и выбор методов оптимизации, а также программно-алгоритмическая реализация последних.

6. Обоснования функционально-алгоритмической структуры системы управления и выбор технических средств, для ее практического воплощения.

7. Практическая реализация полученных результатов и выработка конструктивных рекомендаций по оптимальному управлению технологическим процессом массового культивирования хлореллы в условиях ее промышленного производства.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ХЛОРЕЛЛЫ

Построение математической модели на популяции микроводорослей

Экспоненциальный рост популяции микроводорослей в условиях неограниченных ресурсов питательных веществ и пространства популяции протекает со скоростью, пропорциональной количеству видов преобладающих клеток (65,92), и описывается следующим дифференциальным уравнением

$$\frac{dx}{dt} = \mu x \quad (2.1)$$

где μ - коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость роста популяции;

x - концентрация микроводорослей.

Удельная скорость роста характеризует физиологические свойства микроводорослей и зависит от концентрации субстрата, наличия ингибиторов и активаторов в среде, количества и качества засева питательной среды, освещенности, температуры, Ph среды и т.д.

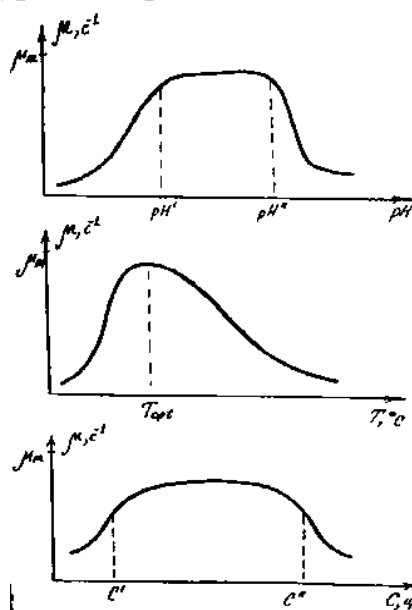


Рис.2.1. Зависимости изменения μ от Ph, T, C.

На рис. 2.1 представлены зависимости изменения μ от концентрации водородов иона, температуры и освещенности

Большинство попыток проследить происхождение закона роста популяции от химических или физиологических факторов явилось неудачным, хотя была предпринята попытка связать рост с концентрацией ресурсов (51). Аналогия с прямоугольной гиперболой и законами ферментативной кинетики и активной массы привела к широкому использованию в микробиологии данного уравнения.

$$\mu = \frac{\mu_m S}{K_S + S} \quad (2.2)$$

где μ_m - максимальная удельная скорость роста, которая может появиться при отсутствии ингибиторов и активаторов, а также при постоянстве физико-химических факторов.

В зависимости от одного ингибитора уравнение (2.2) рассчитывается по формуле.

$$\mu = \mu_m \frac{S_i}{K_{Si} + P_i} \quad (2.3)$$

Здесь вместо численного значения S_i может применяться концентрация питательных веществ N, P, Mg, K, CO₂, O₂ и другие, в качестве жесубстрата - необходимый для жизнедеятельности микроводорослей элемент (96,97,98,99,100)

Примем, что из множества питательных веществ некоторые могут выступать в качестве активаторов или же ингибиторов. Т.о. μ зависит от следующих факторов

$$\mu = f(N, P, Mg, K, CO_2, O_2, T, pH, I, C, \dots) \quad (2.4)$$

Теперь можно переписать уравнение (2.2) в следующем виде:

$$\mu = f(\mu_m, z),$$

$$z = z^{(1)}, z^{(2)} \dots z^{(n)}$$

TL - количество рассматриваемых групп параметров.

Используем алгоритмы, описанные в Приложении I для выбора наиболее существенных элементов множества z . В результате получим минимально необходимых три группы параметров. В первую группу параметров ($z(1)$) входят активаторы, во вторую ($z(2)$) ингибиторы, а в третью ($z(4)$) физико-химические переменные.

Итак, усеченное множество Z , имеет следующий более пригодный вид, для целей моделирования:

$$Z^{(1)} = [M, P, CO^2, K]$$

$$Z^{(2)} = [O^2, I]$$

$$Z^{(3)} = [pH, T, C]$$

При наличии в среде ингибитора удельная скорость роста уменьшается на величину $\frac{M_i}{K_i+I}$, которая выводится из уравнения ферментативной реакции в присутствии ингибитора.

$$\mu_1 = \mu_0 - \frac{\mu_0 I_1}{K_{I_1} + I_1} = \frac{\mu_0 K_{I_1}}{K_{I_1} + I_1} \quad (2.5)$$

где K_i - константа, численно равная концентрации ингибитора, при которой удельная скорость роста достигает половин своего максимально возможного значения.

$$\mu = \frac{\mu_m}{2} \quad (2.6)$$

При расчете удельной скорости роста с учетом L (число ингибитора) уравнение (2.5) принимает следующий вид:

$$\mu_1 = \mu_0 \frac{K_{I_1} * K_{I_2} * \dots * K_{I_n}}{(K_{I_1} + I_1)(K_{I_2} + I_2) \dots (K_{I_n} + I_n)} \quad (2.7)$$

$$\mu_1 = \mu_0 \prod_{i=1}^n \frac{K_{I_i}}{K_{I_i} + I_i} \quad (2.8)$$

где, $I = 1, 2, \dots, n$.

При наличии нескольких ингибиторов можно использовать уравнение (2.8) но, как правило, при культивировании микроводорослей хлореллы практически отсутствуют элементы, выступающие в качестве ингибиторов. В связи с этим в дальнейшем при моделировании рассматриваемого конкретного класса объектов не будем учитывать влияние ингибиторов на рост микроводорослей (28,29,36). Расход питательных веществ на поддержание жизнедеятельности микроводорослей описывается уравнением.

$$\frac{dS_m^i}{dt} = m_i X \quad (2.9)$$

Где, S_m^i - количество i -го питательного вещества, потребленного на поддержание жизнедеятельности клеток микроводорослей;

m_i - скорости потребления питательных веществ на поддержание жизнедеятельности единицы микроводорослей.

Общее количество израсходованного i -го питательного вещества на рост и поддержание жизнедеятельности микроводорослей можно определить по уравнению.

$$-\frac{ds_m^i}{dt} = (d_i\mu + m_iX), \quad (2.10)$$

Где, d_i - коэффициент, учитывающий расход i -го питательного вещества на рост единицы микроводоросли.

В соответствии с (2.4) для каждого параметра можем записать

$$\mu_{z_i} = F_i(Z_i)$$

Для аналитического описания степени влияния параметров среда на удельную скорость роста микроорганизмов примем некоторые упрощения. Пусть удельная скорость роста микроводорослей μ в исследуемых $Z_i \in Z'$ интервалах колеблется от 0 до 1.

Примем следующие обозначения

$$\min\{\mu(Z_i)\} = \mu Z_i^{(0)}$$

$$\max\{\mu(Z_i)\} = \mu Z_i^{(m)}$$

Исходя из экспериментальных данных, зависимости удельной скорости роста микроводорослей μ от элементов множества представим в следующем виде

$$r_{z_i} = \exp\left(\frac{(z_i - \varphi_i)^2}{2\delta_i}\right) \quad (2.11)$$

где φ_i -оптимальное значение i -го среднеквадратического отклонения распределения физико-химического фактора;

δ_i - разность между предельным значением параметра и его оптимального значения.

Итак, формулу для вычисления удельной скорости роста микроводорослей можно записать в следующем виде:

$$\mu = \mu_m \frac{Z_i^{(1)}}{K_{Z_i} + Z_i^{(1)}} \prod_{i=1}^N r_{z_i} \quad (2.12)$$

В качестве питательного вещества могут выступать: N, P, K, Mg, CO₂ и др.

Все приведенные уравнения (2.8) - (2.12) - суть основные кинетические уравнения в условиях периодического режима процесса выращивания микро водорослей.

Сведем воедино в систему уравнения, описывающие процесс культивирования микроводорослей. В результате получим следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = \mu x; \\ \frac{dS_{P_i}^i}{dt} = d_{\varepsilon} \mu x; \\ \frac{dS_{M_i}^i}{dt} = m_{\varepsilon} x; \\ \mu = \mu_m \frac{S_i}{K_{S_i}} \exp \left[\frac{(pH - \varphi_1)^2}{\delta_1^2} - \frac{(T - \varphi_2)^2}{\delta_2^2} - \frac{(C - \varphi_3)^2}{\delta_3^2} \right]; \\ \frac{ds}{dt} = (\alpha_1 \mu + m_i) x \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Таким образом, полученная система уравнений (13) описывает процесс культивирования микроводорослей, реализуемый в периодическом режиме. При достижении заданного значения X процесс переводится в непрерывный режим с целью повышения производительности культиваторов и стабильного использования, культур и питательных веществ.

Математическое моделирование гидродинамической структуры потоков в аппарате для культивирования хлореллы.

При составлении математической модели процесса культивирования хлореллы необходимо учитывать изменение концентрации вещества C во времени t и по длине культиватора с учетом реальной гидродинамической структуры потоков.

Известные типовые модели идеального перемешивания, идеального вытеснения, комбинированные – ячеечная, диффузионная модели (7,9,60,104) с определенной степенью точности могут применяться для формализации гидродинамической структуры потоков в различных взаимодействующих по конструктивному оформлению культиваторах.

Гидродинамическая структура потоков в культиваторах обычно наиболее близка к типовой модели идеального перемешивания. Но поскольку рассматриваемый процесс протекает в культиваторах трубчатого типа (61), где $l > d$ (l - длина, d – диаметр аппарата), то в первом приближении когда $l/d \geq 10$ целесообразно использовать модель идеального вытеснения (60,104). В соответствии с этой моделью применяется поршневое течение без перемешивания вдоль потока при равномерном распределении субстанции в направлении, перпендикулярном к движению потока.

Поскольку в рассматриваемом реакторе имеет место достаточно активное продольное и радиальное перемешивание, как более приемлемой все же является диффузионная модель. Однако такая модель описывается дифференциальными уравнениями в частных производных и сопряжена с определенными трудностями, связанных с определением коэффициентов радиальной и продольной диффузии. Поэтому при описании подобных явлений смысл прибегнуть к ячеечной модели.

Математическое описание гидродинамической структуры потоков в виде ячеечной модели состоит из системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\frac{1}{m} * \frac{dS_i}{dt} = \frac{1}{\tau_n} (S_{i-1} - S_i),$$

где $i = 1, 2, 3 \dots m$.

Физическая сущность данной модели состоит в том, что в каждой ячейке рассматриваемый поток подвергается мгновенному радиальному перемешиванию, а между отдельными ячейками отсутствует перемешивание (процесс протекает с достаточно большой линейной скоростью). Количество

предполагаемых ячеек идеального перемешивания m – параметр, характеризующий ячеечную модель. Известно, что если $m = 1$, то ячеечная модель переходит в модель полного смешивания $n \rightarrow \infty$, в модель идеального вытеснения. (107).

При использовании ячеечной модели для описания гидродинамики реальных потоков важно правильно выбрать число ячеек, поскольку она отражает степень перемешивание в аппарате. Следовательно, его роль в яичной модели аналогично роли критерия Пекле в деффузионной модели.

Практические расчеты показывают, что принимать m слишком большим не имеет смысла, поскольку ячеечная модель с числом ячеек $m > 10$ с достаточным приближением воспроизводит свойства модели идеального вытеснения (60).

При определении числа ячеек в ряде случаев можно воспользоваться в формальной аналогией между числом Пекле и величиной. Оказывается, что между этими параметрами существует связь, который с достаточным для практических расчётов точностью выражается следующей зависимостью:

$$m = \frac{W_\alpha}{2b_\alpha} = \frac{2P_\alpha}{2},$$

где W_α – средняя линейная скорость потока,

α – линейные координаты системы,

b_α – коэффициент продольного перемешивания,

P_α – диффузионный критерий Пекле.

По этой зависимости можно определить m и применять в исследованиях вместо диффузионной ячеечную модель, которая значительно проще. Основываясь на формуле (2.16), по экспериментальным данным можно определить число m ячеечной модели. Значение критерия Пекле можно определить по данным о распределении времени пребывания частиц в потоке:

$$P_{\alpha} = \frac{2}{\sigma^2}; \sigma^2 = \frac{\Delta t \sum_{i=1}^n \tau_i C u_i}{t^2 \Delta t \sum_{i=1}^n C u_i}$$

C – концентрация вещества (%);

t – время, мин;

τ – среднее время пребывания частиц в аппарате;

Δt – шаг интегрирования.

Для определения ячеек в ячеечной модели нами были проведены эксперименты на культиваторе ёмкостью 10 м³. Условия проведения эксперимента соответствовали требованиям технологического регламента. Объемный расход питательных веществ составил $V = 1,4$ м³/ч.

В качестве индикатора при снятии экспериментальных кривых использовали аммиачную воду. Анализ гидродинамической структуры потоков проводили импульсным методом, в соответствии с которым давали импульсное возмущение по концентрации аммиачной воды в количестве 120 литров. Среднее время пребывания частиц в аппарате определяли по общепринятой формуле:

$$t = \frac{\Delta t \sum_{i=1}^n t C u_i}{\Delta t \sum_{i=1}^n C u_i}$$

Расчеты по этому уравнению позволили получить следующие результаты:

$$t_{\text{opt}} = 75 \text{ мин}$$

$$\sigma = 0,2.$$

Отсюда следует, что $m = 4,8$. Принимаем значение числа ячеек идеального перемешивания равный 5.

Импульсная характеристика (C – кривая) для ячеечной модели имеет вид

$$C_{кр}(t) = \frac{1}{(m-1)!} * \left(\frac{mt}{t}\right)^{m-1} * \frac{m}{t} e^{-\frac{mt}{t}}$$

Теоретически – кривая (сплошная линия) и экспериментальная (пунктирная линия) для ячеечной модели (m=5) приведены на рисунке 2.2.

Расхождение кривых в начале и конце процесса, с нашей точки зрения, объясняется наличием застойной и (или) других зон, которые по своему объему занимают значительное место с основным объектом культиватора.

Данные о концентрации на выходе из культиватора при импульсном возмущении, приведены в Приложении 2.

Таким образом, на основе полученных кинематических уравнений (2.14) и управления гидродинамической структурой потоков в реакторе (2.15) составляем следующую обобщенную математическую модель процесса культивирования микроводорослей:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx_i}{dt} = \frac{V}{V_i} (x_{i-1} - x_i) + \mu_i x_i \\ \frac{dSp_{ij}}{dt} = \frac{V}{V_i} (Sp_{i-1,j} - Sp_{i,j}) - \alpha_i \mu_i x_i \\ \frac{dSm_{ij}}{dt} = \frac{V}{V_i} (Sm_{i-1,j} - Sm_{i,j}) - \mu_i x_i \\ \mu_i = \mu_m \frac{S_{ij}}{Ks_i + S_{ij}} \exp \left[-\frac{(ph - \varphi_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{(T - \varphi_2)^2}{\sigma_2^2} - \frac{(l - \varphi_3)^2}{\sigma_3^2} \right] \\ \frac{dS_{ij}}{dt} = \frac{V}{V_i} (S_{i-1,j} - S_{ij}) - (\alpha \mu_i + m) x_i \end{array} \right. \quad (2.21)$$

Дальнейшая задача заключается в определении значений коэффициентов, входящих в уравнение (2.21). Эта задача идентификации рассматривается в 2.3.

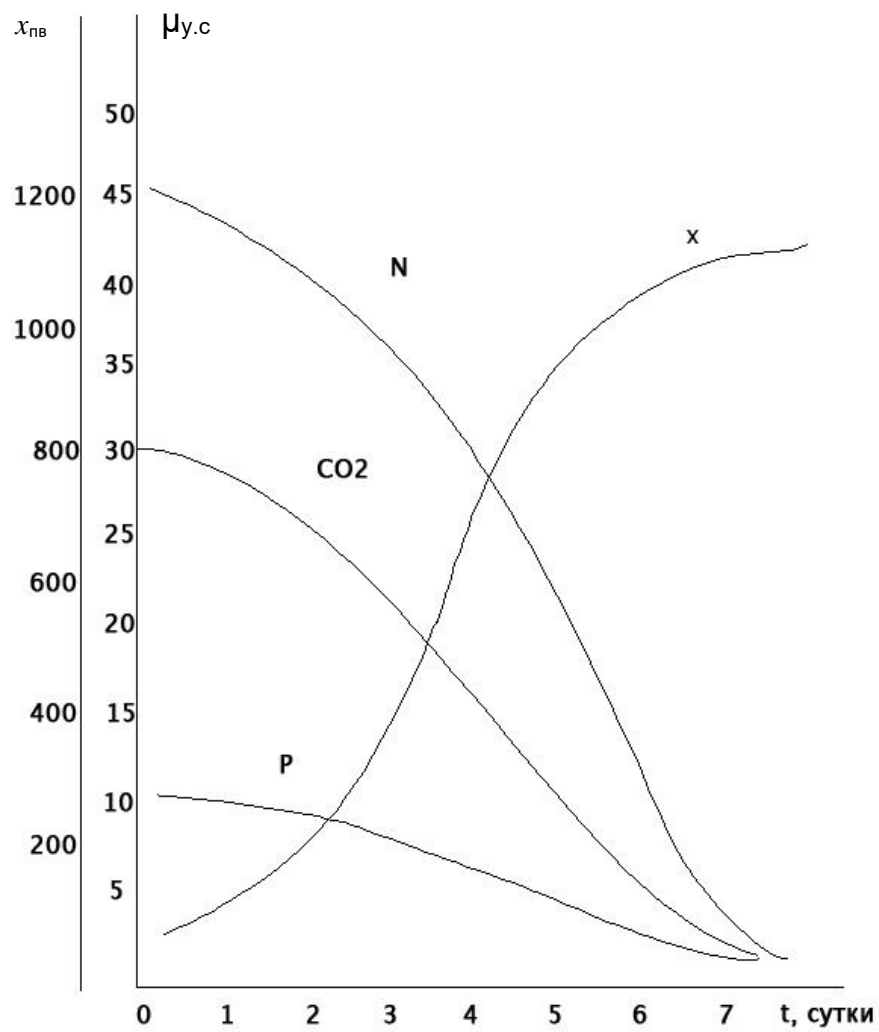


Рис 2.2. Изменение концентрации N, CO₂, P и X во времени.

Параметрическая идентификация математической модели.

Полученная аналитическими приемами модель рассматриваемого процесса представляет собой систему уравнений, описывающую различные стороны объекта исследования с учетом кинетических параметров и реальных гидродинамических режимов. Эти конкретные значения коэффициентов могут быть использованы при решении различных инженерных задач. Определение кинетических констант и параметров модели, наилучшим образом отражающих экспериментальные данные – весьма трудоемкая и сложная задача. Обычно это достигается методами параметрической идентификации (60).

Задача параметрической идентификации состоит в экспериментальном определении характеристик объекта. Оценивание параметров объекта производится в рамках математической модели определенного класса. При этом различия между данными, полученными на реальном объекте и на соответствующей математической модели, должно быть по возможности минимальным. Подробное обсуждение методов параметрической идентификации, в том числе на ввод и анализ условий сходимости, можно найти в работе в работе (9), а также в (105,106).

В любом случае любой метод параметрической идентификации должен давать оценки параметров, которые являются несмещенными,

т.е.
$$E\{Q(N)\} = Q_0 \quad (2.22)$$

при конечном N_3 и состоятельные в среднем смысле, т.е.

$$\lim_{N_3 \rightarrow \infty} E\{\hat{Q}(N_3)\} = \Theta_0 \quad (2.23)$$

$$\lim_{N_3 \rightarrow \infty} E\{\hat{Q}/[\hat{Q}(N_3) - \hat{Q}_0]\} = 0 \quad (2.24)$$

Эти методы приемлемы, когда объект описывается устойчивыми разностными уравнениями, а также при выполнении следующих условий.

- порядок объекта и величина запаздывания должны быть известными;
- изменения входного сигнала $X(t) = X(t) - X_0$ производится без ошибок и известно установившееся значение входа X_0 ;
- входной сигнал не превышает заданный порядок реакции.

При этом матрица

$$H = \{h_{ij} = y^n(i - j)\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (2.25)$$

положительно определена $\det H > 0.2$ и, кроме того, существуют пределы

$$X_0 = \lim_{N_g \rightarrow \infty} \sum_{t=0}^{n-1} x(t); U, \quad (2.26)$$

$$\varphi(\tau) = \lim_{N_g \rightarrow \infty} \sum_{\tau=0}^{N_g-1} x(t) * (x(t) + \tau); \quad (2.26)$$

где τ – время сдвига.

На выходной сигнал $y(t) = y(t) - y_0$, как правило, могут действовать возмущения. Установившиеся значение y_0 , считается известным и равно величине x_0 , умноженной на статический коэффициент вида

$$y_0 = y^* x_0 + E(t)$$

Ошибка уравнения $E(t)$ не корректирована с элементами данных $y(t)$. Это означает, что эти значения статически не известны.

Воспользуемся этими обстоятельствами и условиями идентификации и попытаемся определить необходимые значения коэффициентов, входящих в уравнение (2.21).

Предполагая, что решение уравнения (2.21) существует и что измерения на объекте исследования всегда осуществимы (с некоторой ошибкой), можно считать, что величины $y(t)$ и $x(t)$ зависят от точности измерения, величины входного шума и правильного выбора наблюдаемого вектора состояния.

Чтобы избежать ситуации, когда малые ошибки экспериментальных данных могут повлечь большие ошибки в определении констант, требуется оценка корректности постановки задачи идентификации. Кроме того, важен вопрос о достаточности экспериментальных данных, возникающий при исследовании конкурирующих моделей. Эти существенные аспекты рассмотрены в работах (52, 60, 53, 54).

В процессе культивирования микроорганизмов на детерминированные кинетические зависимости накладывается множество возмущений, носящих характер, чем и объясняется возникающая необходимость периодической или постоянной подстройки коэффициентов модели. Идея корректировки параметров модели, процесса культивирования микроводорослей рассмотрена в работе (11), а в наиболее общем виде постановки этой задачи осуществлена в работе (15).

Задача оценивания констант связана с надежным выбором метода, обеспечивающего требуемую точность и быструю сходимость поиска. В

настоящее время разработано достаточно большое количество методов оценки кинетических констант (60, 56). Среди них наибольшее распространение получили метод наименьших квадратов, метод максимального правдоподобия и метод оценок на основе теоремы Байеса.

Однако следует заметить, что при оценке кинетических констант, биохимических и микробиологических реакций до сих пор еще нередко используется графический метод, уступавшей по точности аналитическим и трудно поддающийся формализации на ЭВМ (11).

Входящие в исходные уравнения коэффициенты α, m, β, γ можно, определить графо - аналитическим методом. Воспользуемся следующими соотношениями:

$$\frac{S(0) - S(t)}{\int_0^t x(t)dt} = \alpha \frac{x(t) - x(0)}{\int_0^t x(t)dt}, (2.29)$$

$$\frac{P(t) - P(0)}{\int_0^t x(t)dt} = \beta \frac{x(t) - x(0)}{\int_0^t x(t)dt} + \gamma, (2.30)$$

в приведенных соотношениях (2.29) и (2.30) величин $S(0), S(t), x(0), x(t), P(0), P(t)$ представляют собой мгновенные значения концентрации субстрата S , микроорганизмов x , продуктов метаболизма P в момент времени 0 и t , значение $\int_0^t x(t)dt$ численно равно площади, ограниченной сверху кривой роста клеток на временном интервале от 0 до t .

На основании соотношений (2.29) и (2.30) методом графического интерпретирования необходимо провести эксперименты и на этой основе построить графики и далее вычислить значения γ, m, β . В работе (11) приведены результаты именно такого определения значений этих коэффициентов.

Как показал опыт, данный метод сопряги с определенными трудностями, особенно для специалистов, не обладающих достаточным опытом экспериментального исследования технологических процессов. Только после многочисленных экспериментов и контрольных расчетов можно убедиться в правильности полученных значений коэффициентов. Поэтому нами с целью преодоления этих трудностей, ускорения расчетов и получения

более точных и достоверных результатов использованы методы приближенного дифференцирования.

Биокаталитический процесс описывается в общем виде уравнением;

$$y=f(c)$$

Значения $f(c)$ как правило на первоначальном этапе представляют собой результат экспериментов. Полученные экспериментальные данные наносятся на график, где осью абсцисс служит C , а осью ординат t . В качестве C могут выступать концентрация субстрата - S . культуры - X или концентрации других каких - либо интересующих нас веществ. С этой целью выполнены эксперименты, результаты которых приведены на рис. 2.3.

Поскольку концентрации субстрата (питательных веществ) меняется в широких пределах и имеет прямую связь с другими биокаталитическими процессами и явлениями, удобнее и точнее определять значения интересующих нас коэффициентов именно через данный параметр. Концентрацию - S субстрата (концентрацию питательных веществ) также точнее и быстрее можно определить экспериментальными приемами.

Какой бы процесс не описывался рассматриваемой нами функцией $y=f(C)$ производную Y' с физической точки зрения можно интерпретировать как скорость, с которой протекает этот процесс (30,33,34,36,37,38,39).

Для нахождения на отрезке $[t_0, t]$ производных $S'(X)$ приближенно заменим функцию интерполяционным полиномом Ньютона, построенным для требуемых t_0, t_1, \dots, t_{n0} .

Тогда $S'(t)$ для трех точек приобретает следующий вид:

$$S'(t) = \frac{1}{h} \left[\Delta S_0 + \frac{2q-1}{2} \Delta^2 S_0 + \frac{3q^2-6q+2}{6} \Delta^3 S_0 \right] \quad (2.32)$$

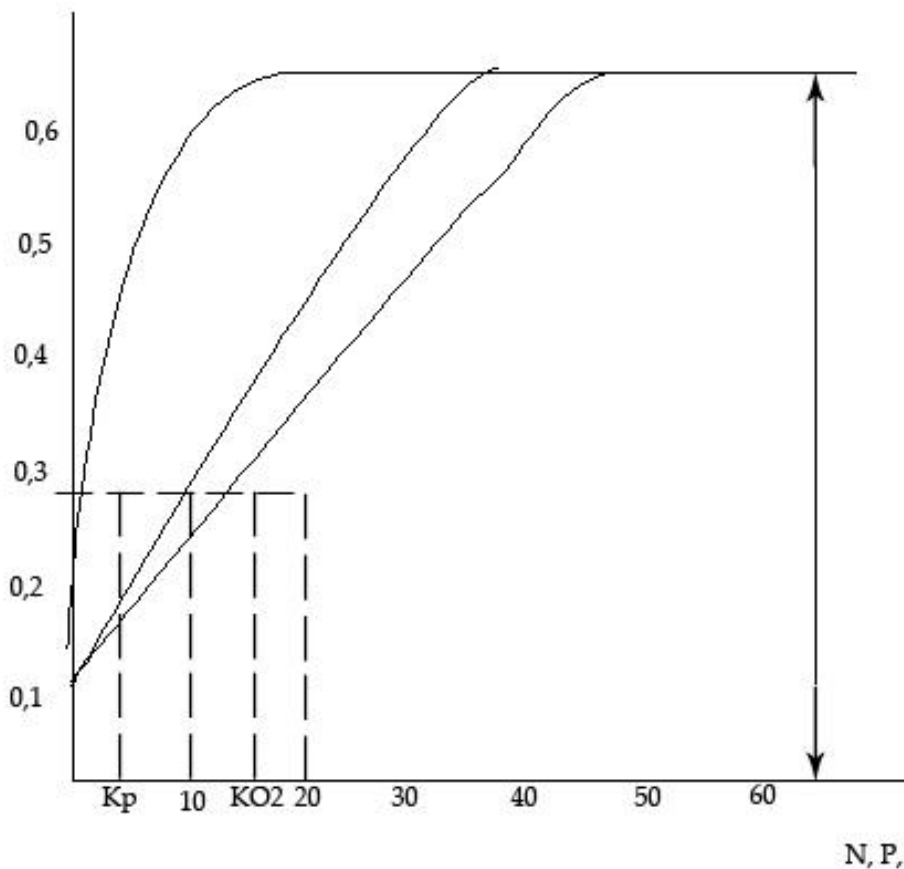


Рис 2.3. Зависимость удельной скорости роста хлорелл от концентрации питательных веществ P, N, CO₂.

где, $q = \frac{t_{i-1} - t_i}{h}$ представляет собой число шагов, необходимых для достижения точки t исходя из точки t_0 и

$$h = t_{i+1} - t_i (t = 0, 1, 2, \dots, n).$$

Здесь, $\Delta S_0, \Delta^2 S_0$ и $\Delta^3 S_0$ определяется методом конечных разностей. В итоге получаем три алгебраических уравнения с тремя неизвестными в следующем виде:

$$\begin{cases} -S'(t_0) = [\alpha\mu(t_0) + m + \beta\gamma(t_0)]X_0; \\ -S'(t_1) = [\alpha\mu(t_1) + m + \beta\gamma(t_1)]X_1 \\ -S'(t_2) = [\alpha\mu(t_2) + m + \beta\gamma(t_2)]X_2 \end{cases}$$

Здесь значения $S'(t_0), S'(t_1), S'(t_2)$ известны: они определяются по результатам экспериментов; α, m, β неизвестные коэффициенты.

Для решения системы уравнений применим метод последовательного исключения неизвестных (метод Пуассона) В результате получим

$$\begin{array}{lll} \alpha^N=1,5; & m^N=0,06; & \beta^N=0,06; \\ \alpha^P=1,3; & m^P=0,05; & \beta^P=0,05; \\ \alpha^{CO_2}=1,1; & m^{CO_2}=0,02; & \beta^{CO_2}=0,02; \end{array}$$

Анализ полученных данных показывает, что значение коэффициента β всегда мало. Это указывает на то обстоятельство, что в ходе культивирования микроводорослей хлореллы вторично продукты практически не образуются.

Это предположение подтверждается результатами анализа хода исследуемого технологического процесса. Таким образом, при дальнейшей работе с (2.33) можно принять $\beta = 0$, что значительно упрощает системе уравнений. Значение K_N^s определяется по зависимости скорости реакции от концентрации субстрата. Удельная скорость ферментативного превращения субстрата в биомассу V_{yg} (рис. 2.3) вычисляется по формуле:

$$V_{yg} = \frac{S_0 - S}{t_i - t_1} * \frac{1}{x} \gamma$$

В производственных условиях используются и другие питательные вещества (субстраты), но они не оказывают существенного влияния на скорость процесса. Поэтому в дальнейших расчетах будем учитывать только такие существенные факторы, как N, P, CO₂. Из данных рис. 2.3 определяются значения K_s для N, PиCO₂. Найденные таким образом значения таковы:

$$K_p=2; K_{CO_2}=12; K_N = 17.$$

Экспериментальные зависимости μ от рН, Т, С приведены на рис.2.4.

В результате обработки экспериментальных данных методом моментов получены значения μ и δ . Для μ в зависимости от рН имеем: $Y_1=6,7$; $\delta=6,2$; для Т : $Y_2 = 29,8$; для С : $Y_3= 26,5$.

Таким образом, решив задачу параметрической идентификации предложенной модели, можно приступить собственно к исследованию на ЭВМ результатов моделирования процесса культивирования хлореллы.

Анализ результатов моделирования технологического процесса массового культивирования хлореллы

Модель технологического процесса культивирования микроводорослей, полученная в предыдущих параграфах, представляет собой приближенное описание сложного механизма ферментативных превращений и освоения различных питательных веществ (N, P, K, Mg, CO₂ и др.), необходимых для роста и размножения микроводорослей. Эту модель можно представить как гомоморфную, разработанную при определенных допущениях.

Прежде чем использовать полученную модель с определенными на основе процедур параметрической идентификации параметрами, ее адекватность реальным процессам.

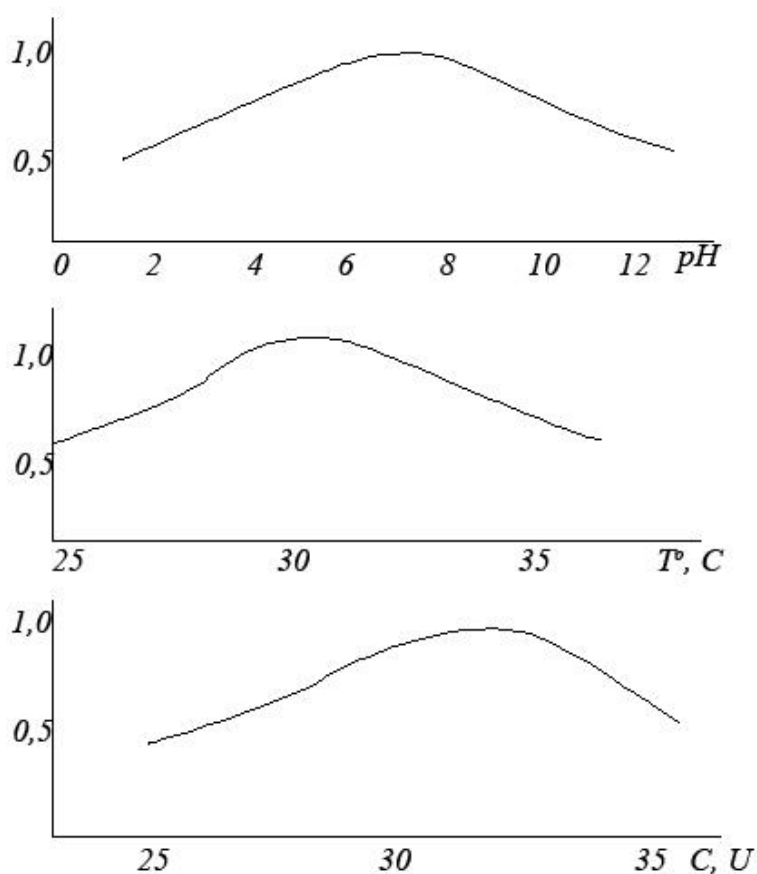


Рис 2.4. Зависимости μ от pH, T, C : α – μ от pH ; β – μ от T ; β – μ от C

Только после этого можно имитировать и исследовать на ЭВМ различные режимы и вырабатывать конкретно рекомендации технологам по оптимальному ведению процесса, использовать полученные модели для решения оптимизационных задач, а также для обоснованного синтеза систем управления. С этой целью нами проведены экспериментальные исследования, направленные на

определение значений коэффициентов и режимных параметров исследуемого объекта (34,35,39).

На рис. 2.5 представлены расчетные и экспериментальные данные, отражающие основные показатели культивирования хлореллы при периодическом режиме процесса. Сравнение результатов, полученных на основе теоретических расчетов путем решения систем уравнений (2.14), с опытными данными, соотнесенными с требованиями технологического регламента, показали, что расчетные данные совпадают с экспериментальными с

точностью до 5-7%. Здесь уместно отметить, что для рассматриваемого класса объектов экспериментальное определение количества превращенного или употребленного на рост и размножение веществ (N, P, K, Mg, CO₂ и др.) представляет достаточно трудную задачу и в некоторых случаях она даже практически не поддается решению. Между тем, предложенная модель процесса, представленная в виде системы уравнений (2.14), позволяет теоретически качественно устанавливать и количественно оценивать значения расхода питательных веществ и элементов, а также оперативно прогнозировать ход технологического процесса.

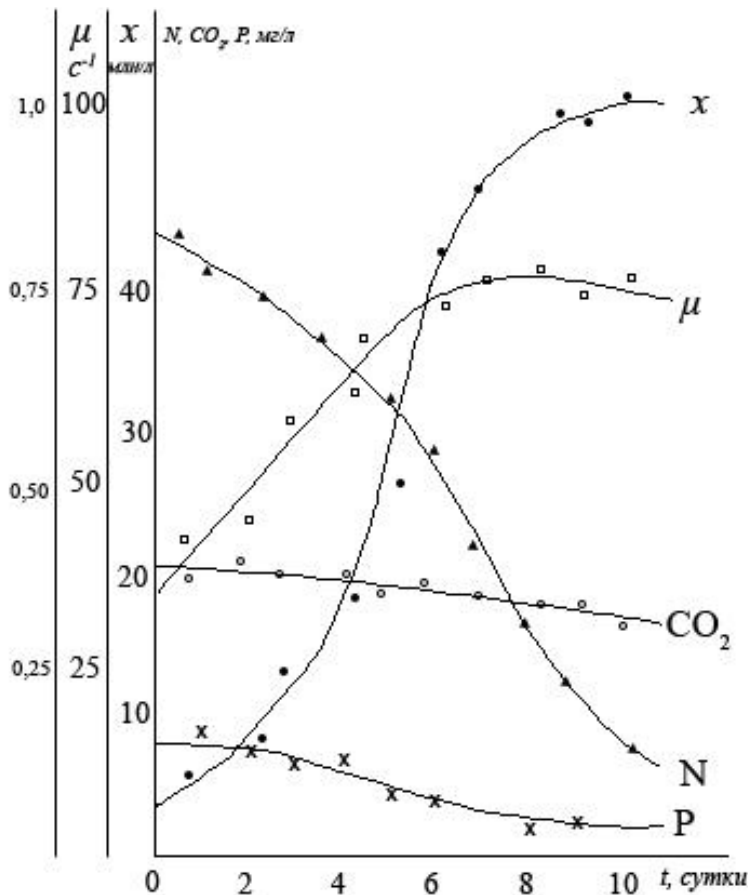


Рис 2.5. Зависимость основных показателей культивирования хлореллы от времени при периодическом режиме процесса.

Приведенные на рис. 2.5 сопоставительные данные позволяют установить адекватность полученных в виде уравнений (2.14) моделей, описывающих периодические режимы культивирования, реальному процессу.

Поскольку рассматриваемый процесс культивирования хлореллы ведется в непрерывном режиме, необходимо стоит проверить на адекватность и полученные в виде (2.21)

модели.

Модель процесса культивирования хлореллы решалась методом Кутта-Мерсона. Блок-схема алгоритма решения уравнений модели приведена на рис. 2.6.

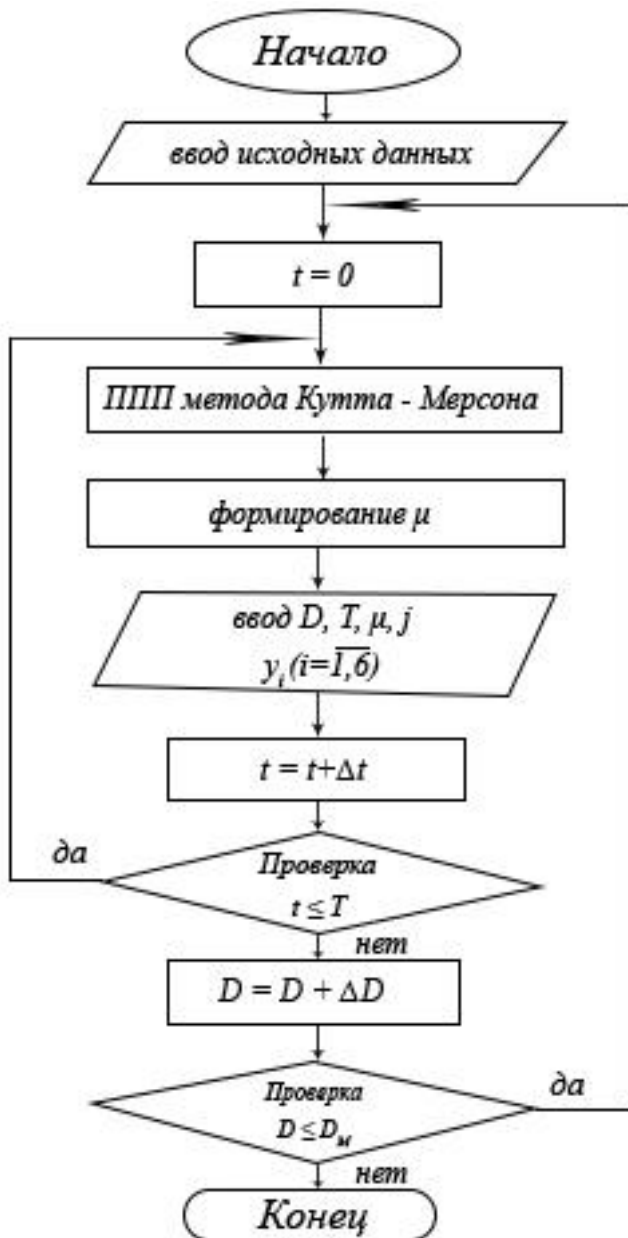
При решении системы уравнений (2.21) исходные данные брались из экспериментальных данных, полученных непосредственно на исследуемом объекте, а также из результатов лабораторных анализов.

При моделировании принимались следующие начальные условия:

$$X(t) = 20 \text{ мг/л}; S_N = 45 \text{ мг/л}; S_o = 14 \text{ мг/л}; S_{CO_2} = 30 \text{ мг/л}.$$

При этом учитывались и ограничения, накладываемые на процесс. Технологические параметры поддерживались при $V = 1 \cdot 6 \text{ м}^3/\text{сутки}$ ($V=1,4$

м³/сутки). Время пребывания хлореллы в реакторе принято в пределах 10 суток > t > 2 суток или (240 ч > t > 46 ч).



Время культивирования при непрерывном режиме находится в диапазоне

$$T = \frac{V}{U} = (2 \div 10)$$

Рис. 2.6. Блок – схема расчета основных показателей культивирования хлореллы при непрерывном режиме процесса.

Обратное значение времени пребывания в биотехнологических объектах представляет собой дебит сула, лежащий в пределах.

По результатам моделирования получены зависимости изменения концентрации хлореллы от времени при различных значениях дебита (рис. 2.7).

Процесс исследован при значениях 0,21 м³/ч

$$240X > t > 0 \text{ и } 0,02r^{-1} > \delta > 0$$

Анализ режимов ведения процесса по результатам моделирования показал, что при $U_p = 4$ м³/сутки (объемная скорость отбора)

хлорелла вымывается из ферментера и не успевает расти (рис. 2.8). Уменьшение скорости отбора приводит к постепенному увеличению объема хлореллы в ферментере, что требует определенного количества питательных веществ на поддержание жизнедеятельности излишней хлореллы.

На рис. 2.9 приведены кривые, позволяющие заключить, что скорость роста хлореллы не зависит от скорости циркулирующего потока.

Результаты проведенных на модели, описываемой уравнениями (2.14) и (2.21) расчетов, позволили количественно оценить затраты питательных веществ, необходимых на рост и размножение микроводорослей, устанавливать необходимую скорость отбора культуры из ферментера, с

необходимой точностью определить скорость роста микроорганизмов с учетом необходимой группы факторов, оказывающих непосредственное влияние на ход культивирования.

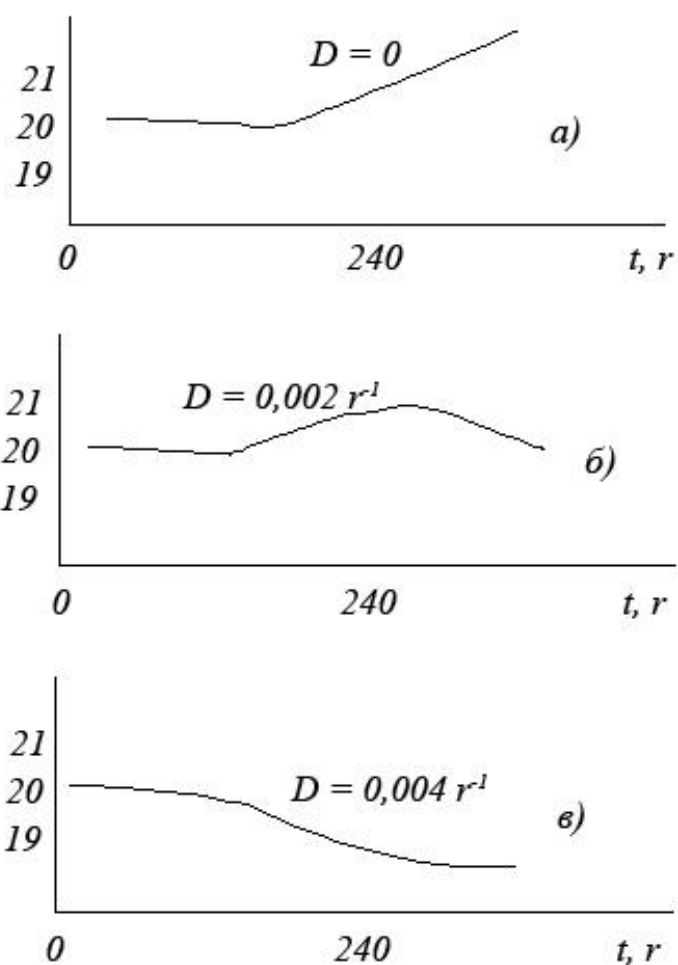


Рис.2.7. Зависимости изменения концентрации хлореллы от времени при различных значения дебита: а) $-D=0$; б) $-D = 0.0024^{-1}$; в) $-D=0.0044^{-1}$

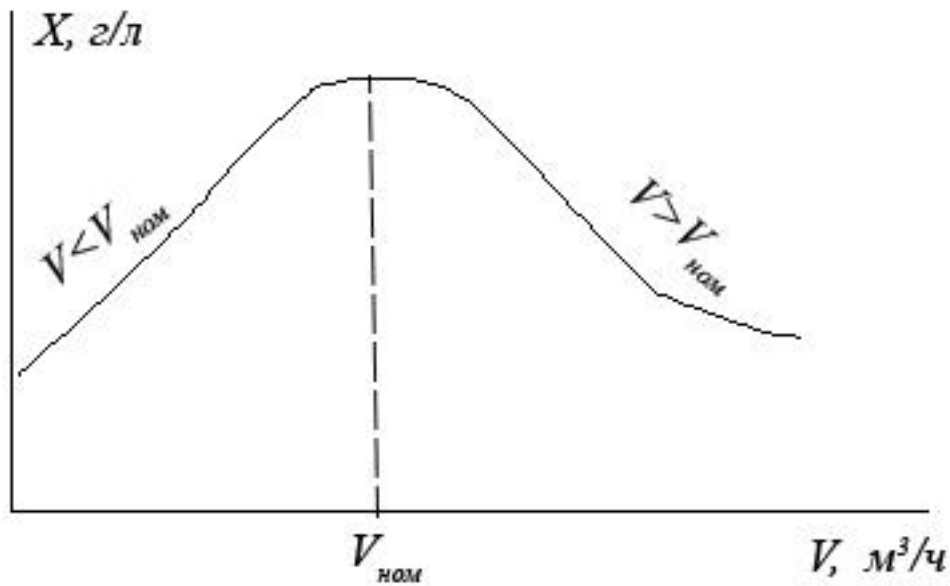


Рис. 2.8. Изменение концентрации хлореллы в зависимости от объемной скорости V ; $V_{ном}$ – номинальная объемная скорость

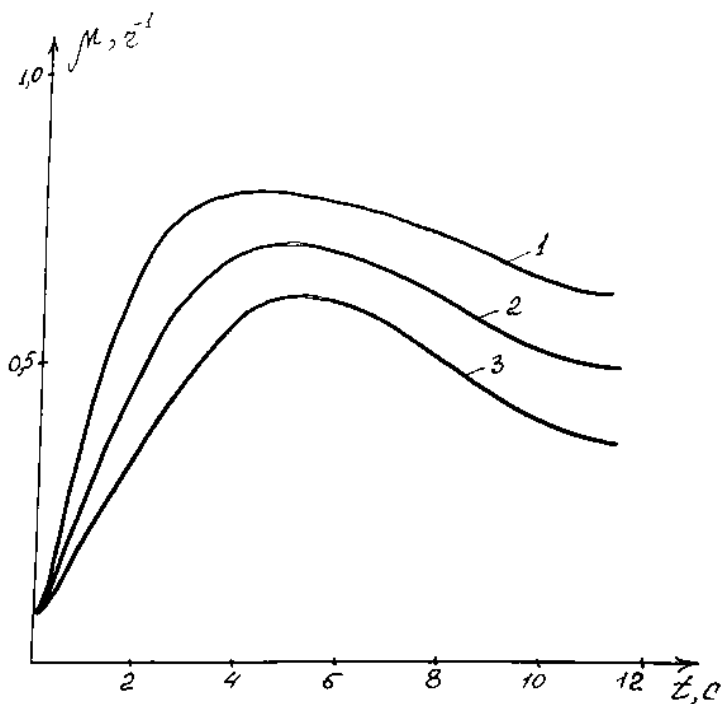


Рис.2.9. Зависимость потока изменения роста хлореллы от скорости циркулирующего потока:
1-0 м/с; 2-0,5 м/с; 3-0,7 м/с

Таким образом, на основе анализа результатов проведенного на ЭВМ моделирования появляется возможность определить достоверность теоретически выведенных уравнений, описывающих основные явления процесса культивирования хлореллы, количественно оценить технологические

параметры, использовать предложенную модель для целей оптимизации и автоматического управления, а также практически решать разнообразные исследовательские и прикладные задачи.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЙ ПРОТЕКАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Обоснование критерия оптимальности

При решении задач оптимизации, а также синтеза систем управления необходимо провести выбор и обоснование критерия оптимальности. Его можно рассматривать как достижение экстремума некоторой величины. В качестве такого критерия может выступать комплекс технико-экономических показателей - таких, как производительность процесса, приведенные затраты», рентабельность, качество выпускаемого продукта, прибыль от реализации продукции и т.д. (21,22,60,61).

При реализации задач управления технологическими процессами, нахождения оптимальных управляющих воздействий и создания алгоритмов управления, реализующих оптимально режимы технологических процессов, необходимо представить критерий оптимальности в виде функции цели, экстремум которой наилучшим образом отвечает предназначению данного объекта и выраженной в виде соответствующих технико-экономических показателей. Критерий оптимальности должен представлять собой интегральный показатель, отражающий основные стороны деятельности производства. В качестве такого критерия для типовых микробиологических производств чаще всего принимают прибыль — как наиболее обобщенный показатель, отражающий практически все аспекты деятельности предприятия (62)

$$\Pi(V) = P(V) * C(V) - \sum Z_i(V), \quad (3.1)$$

где, Π – прибыль предприятия за определенный временной интервал,

C – цена готового продукта;

$\sum Z_i$ – суммарные затраты на производство за тот же отрезок времени;

P – количество произведенного продукта за определенный временной интервал.

Для рассматриваемого класса объектов задача оптимального управления формулируется как задачи максимизации прибыли при ограничениях на качество продукта, удельные расходы сырья и реагентов:

$$\Pi(V) \rightarrow \max, \quad x \geq x^{\text{зад}}, C_i \leq C_i^{\text{зад}} \quad (3.2)$$

где x_i и $x_i^{\text{зад}}$ - соответственно фактическая и заданная концентрации микроорганизма в готовом продукте;

C_i и $C_i^{\text{зад}}$ - фактические и допустимые удельные нормы расходов сырья и реагентов соответственно.

Раскрыв величины, входящие в выражение (3.1), перепишем его в виде

$$\Pi = -Z_{\text{п}} + (P_{\text{ф}}C - Z_{\text{ф}}) - Z_{\text{у}} \quad (3.3)$$

Здесь $Z_{п}, Z_{ф}$ - затраты на приготовление питательной среды и на ферментацию за определенный период времени;

$Z_{у}$ - условно - постоянные затраты;

P - количество целевого продукта, произведенного за определенный период (производительность).

Прибыль предприятия с увеличением количества произведенного целевого продукта имеет тенденцию к повышению показателей на всем интервале возможных величин производительности. Как видим, задача максимизации прибыли в данном случае совпадает с проблемой максимизации производительности технологической установки.

Таким образом, речь идет об объеме целевой продукции процесса культивирования хлореллы, произведенной на некотором отрезке времени, за вычетом потер которые для упрощения задачи принимаются постоянными).

Величина P в (3.1) полностью формируется на стадии ферментации и принимается в качестве критерия управления этой стадией при следующих ограничениях на концентрацию остаточных питательных веществ C_i - культуральной жидкости, удельные расходы сырья и реагентов:

$$P_{\phi}(\bar{Y}; \bar{U}) = \max; \quad b(\bar{Y}; \bar{U}) \leq B_{дон}$$

$$C_i(\bar{Y}; \bar{U}) \leq C_i^{зад}$$

где $(\bar{Y}$ и $\bar{U})$. - соответственно векторы переменных состояния и управляющих воздействий.

Производительность конкретного культиватора определяется как по производительности каждого производственного цикла, так и по оборачиваемости аппарата (т.е. определяется частотой этих циклов). Следовательно, в качестве критерия управления может выступать следующее выражение:

$$I = P_i \frac{\sum_{j=1}^m P_{ij} V_{ij}}{\sum_{j=1}^m (t_{ij}^{\phi} + t_{ij}^{nod} + t_{ij}^{np})} \quad (3.5)$$

где P_{ij}, V_{ij} -соответственно объем среды в i -ом культиваторе и концентрация в ней микроорганизмов j -ой ферментации;

t_{ij}^{ϕ} - продолжительность j -ой ферментации;

t_{ij}^{nod} - время подготовки ферментера к выполнению j -ой ферментации;

t_{ij}^{np} - время простоя аппарата в циклах, проведенных рассматриваемый период.

$$I = \frac{\Pi}{T}$$

Здесь Π - прибыль от реализации целевого проекта, (руб);
 T - время, за которое получена данная прибыль.

Из (3.5) видно, что на целевую функцию кроме параметров, определяемых самой ферментацией, оказывают влияние так же и показатели подготовительных операций и время простоя оборудования.

Для достижения критерия (3.4) следует добиваться максимизации этой величины на каждом этапе технологического цикла.

Теперь задача управления ферментационным циклом может быть сформулирована следующим образом: необходимо определить такие управляющие воздействия из области допустимых (\bar{u}), которые доставили бы максимум критерию оптимальности при заданных начальных условиях, а также при соблюдении ограничений на содержание остаточных питательных солей в среде, на удельные расходы сырья и реагентов.

В символах теории множеств эта задача может быть формализована следующим образом:

$$\max\{I[\bar{Y}(t_k), t_k]/G[\bar{Y}(t), t] = 0;$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{Y}(t) \in \Omega_{\bar{Y}_0} \bar{U}(t) \in \Omega_{\bar{U}_i} \quad b(\bar{Y}, \bar{U}) \leq b_{don}; \\ C_i(\bar{Y}, \bar{U}) \leq C_i^{зад} \end{aligned} \right\}$$

Здесь через \bar{G} обозначен вектор зависимостей математической модели процесса, компонентами которого являются функции от вектора переменных состояний \bar{Y} , вектора их производительности по времени - \bar{Y} , вектора управляющих воздействий \bar{U} и

текущего времени t . Множество $\Omega_{\bar{U}}$ определяет область допустимых начальных условий процесса. Множество $\Omega_{\bar{Y}_0}$ определяет область допустимых значений управляющих воздействий. Параметр t_k означает время окончания процесса.

Для оперативного управления производством необходимо иметь возможность оценивать значения критерия в ходе процесса за короткие промежутки времени и прогнозировать влияние управляющих воздействий на критерий оптимальности. Поскольку процесс культивирования может осуществляться в периодическом или непрерывном режимах необходимо рассмотреть возможности и условия выбора критерия оптимальности. Для непрерывного режима, когда в каждый момент времени состояние процесса определяется только параметрами состояния и не зависит от состояния

процесса в предыдущие моменты времени, можно использовать мгновение оценки. При этом критерий будет иметь смысл мгновенного значения производительности процесса, отнесенного к прибыли. Для периодических процессов, когда выход готового продукта имеет место только в момент завершения технологического цикла, оценки критерия имеют смысл только на момент окончания технологического цикла. Для этого случая интервал времени T в формуле (3.5) приобретает смысл длительности технологического цикла, а критерий представляет собой среднюю за цикл производительность аппарата по отношению к прибыли. Критерий в виде (3.1) или (3.3), хотя и является обобщенным показателем, но, иногда, когда целевой продукт не имеет еще окончательного товарного вида, более чувствителен к управляющим параметрам. В этом случае он является критерием, который непосредственно связан с прибылью рассматриваемого класса объектов. Поэтому целесообразно выбрать критерий оптимальности в виде задачи максимизации целевого продукта

$$I = \mu x / D \quad (3.6)$$

Данный критерий имеет прямую связь с ранее рассмотренными (3.3) и (3.4), поскольку увеличение выхода целевого продукта приводит к повышению производительности и, тем самым, к возрастанию прибыли. При этом ограничением является время пребывания микроорганизмов в культиваторе.

$$0 \leq D \leq \mu \quad (3.7)$$

В дальнейшем при решении задач технологической оптимизации и оптимального управления воспользуемся соотношениями (3.6) и (3.7) как основными критериями и необходимыми для процесса культивирования хлореллы условиями.

Разработка алгоритма оптимизации непрерывного технологического процесса культивирования микроорганизмов

Микробиологические процессы характеризуются режимом работы, при котором сложная биохимическая реакция и явления массообмена сопровождаются интенсивным потреблением различных питательных веществ и однорежимным ростом и размножением культуры или же образованием целевого продукта. При этом, как показал анализ результатов моделирования, содержание питательных веществ постоянно уменьшается и уменьшается скорость роста, хотя на начальной стадии значение этих показателей интенсивно возрастает.

Попытка оптимизировать процесс по соответствующим критериям, приведенным в 3.1, в каждый момент времени приводит к форсированному падению скорости роста культуры. В результате работа ферментера оказывается далека от оптимальных режимов. Поэтому при оптимизации необходимо выбрать такой режим и желаемую траекторию скорости роста (в зависимости от режима вентилирования микробиологического процесса хемостата или трубостата), которые обеспечивали бы оптимальное значение целевой функции и одновременно удовлетворяли бы ограничениям накладываемым на режим работы культиваторов, описываемых системой уравнений (2.21).

Ввиду сложности и недостаточной изученности рассматриваемого класса процессов наилучший в определенном смысле технологический режим не может быть определен заранее, так как его выбор зависит от ряда факторов, информация о которых выявляется уже в ходе самого процесса. Для оптимизации объекта необходимо реализовать условия обеспечения наилучшего качества выходного продукта, соответствующего экономическим нормам и конкретным производственным условиям. Отмеченные обстоятельства приводят к тому, что свойства качества выпускаемого целевого продукта изменяются в широких пределах. Поэтому необходимо решить сложную оптимизационную задачу, которая учитывала бы заданные значения входных и управляющих параметров.

Задача решается на основе математической модели с привлечением эффективных вычислительных методов и современных средств вычислительной техники.

Объект управления описывается уравнением типа

$$\frac{dx}{dt} = f_s(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_n, t)$$

Пусть задано начальное значение x^0 в момент времени $t = t_0$. Тогда каждому управлению $U \in V$ (U - некоторое множество, содержащее ограничение, вытекающее из условий технологического регламента, отвечает текущее состояние)

$$x = x(t, u, x^0, t_0)$$

S - некоторая поверхность в пространстве переменных t, x_1, \dots, x_n задаваемая уравнением

$$S(t_1, x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

Задача оптимального управления состоит в таком выборе $U \in V$ чтобы в некоторый момент t , модель, описываемая системой уравнения (2.21),

достигла поверхности S и при этом управление (U_1, \dots, U_n) и фазовые координаты $(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_n, t)$ удовлетворяли бы ограничениям:

$$F_1(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_n, t) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, k.$$

Ограничения F_1 могут быть функционалами.

Теперь обратимся к процессу оптимизации культиватора на интервале времени $(0, T)$. Здесь T может быть переменной величиной или же заданным фиксированным моментом окончания процесса. В этом случае на управляющие функции наложены ограничения

$$U(t) \in V, \quad 0 \leq t \leq T$$

где V - заданное ограничение, соответствующее условиям технологического регламента.

При этом задача оптимизации заключается в определении допустимого вектора функции $u(t)$, которая доставляет экстремум условному критерию, описываемому функционалом вида

$$I = \int_0^T Y(u, x) dt$$

Пусть в n -мерном пространстве задача движущаяся с постоянной скоростью точка

$$\frac{dx_s}{dt} = U_s$$

$$\sum_{s=1}^n U_s = 1, \quad S = 1, 2, \dots, n.$$

Предположим, что в начальный момент $t = t_0$ она находится в точке X не являющейся оптимальной для функции $f(X)$. Рассмотрим вопрос о том, при движении в каком направлении точки из X значения функции $f(X)$ возрастает (убывает) с наибольшей скоростью. Известно, что такое направление определяется градиентом функции $f(x)$, вычисленной в точке $X = \bar{X}$, т.е.

$$\Delta f = \left\{ \frac{df}{dx_1} / x = \bar{x}, \dots, \dots, \frac{df}{dx_n} / x = \bar{x} \right\}$$

Действительно, если направление движения точки входящей из состояния X определить вектором $i = \{l_1, \dots, l_n\}$, то уравнение этого движения можно представить в виде

$$x = x_s + l_s t; \quad s = 1, 2, \dots, n;$$

$$t \geq 0$$

Скорость возрастания функции $f(x)$ вдоль луча из начальной точки \bar{X} определяется формулой

$$\frac{df}{dt} / t = 0 = \sum_{s=1}^n \frac{df(\bar{X})}{dX_s} l_s$$

Правая часть этого соотношения имеет наибольшее значение при

$$l = \frac{\frac{df(\bar{X})}{dX_s}}{\sqrt{\sum_{s=1}^n \left(\frac{df(\bar{X})}{dX_s}\right)^2}}$$

Формула (3.8) дает выражение для компонент единичного вектора, направленного по градиенту функции $f(x)$. Функция $f(x)$ при движении из точки \bar{X} имеет наибольшую скорость убываний обратна направлению вектора (3.8). Это свойство градиента $f(x)$ положено в основу метода численного отыскания значений управляющих параметров, при которых $f(x)$ имеет минимум. Этот метод дает хорошие результаты лишь при наибольшем числе входных параметров. Он эффективен также в сочетании с другими методами.

Основная идея метода заключается в случайном выборе направления движения на каждом шаге. При всем многообразии методов случайного поиска их объединяет применение случайного вектора Δx имеющего равновероятную возможность различного направления в последующем пространстве переменных. При формировании случайного вектора используются случайные числа (91). Рассмотрим использованный нами алгоритм случайного поиска с абсолютным смещением (20).

Метод случайного поиска с абсолютным смещением применяется для многократного выполнения случайного шага до тех пор, пока это не приведет к успеху. Если $\Delta x^{(f)}$ - успешный шаг, то выбирается

$$\Delta x^{(j+1)} = -\Delta x^{(j)}$$

проверяется, успешен ли такой выбор? Если же $\Delta x^{(j)}$ привел к неудаче, то выбирается

$$\Delta x^{(j+1)} = \Delta x^{(j)}$$

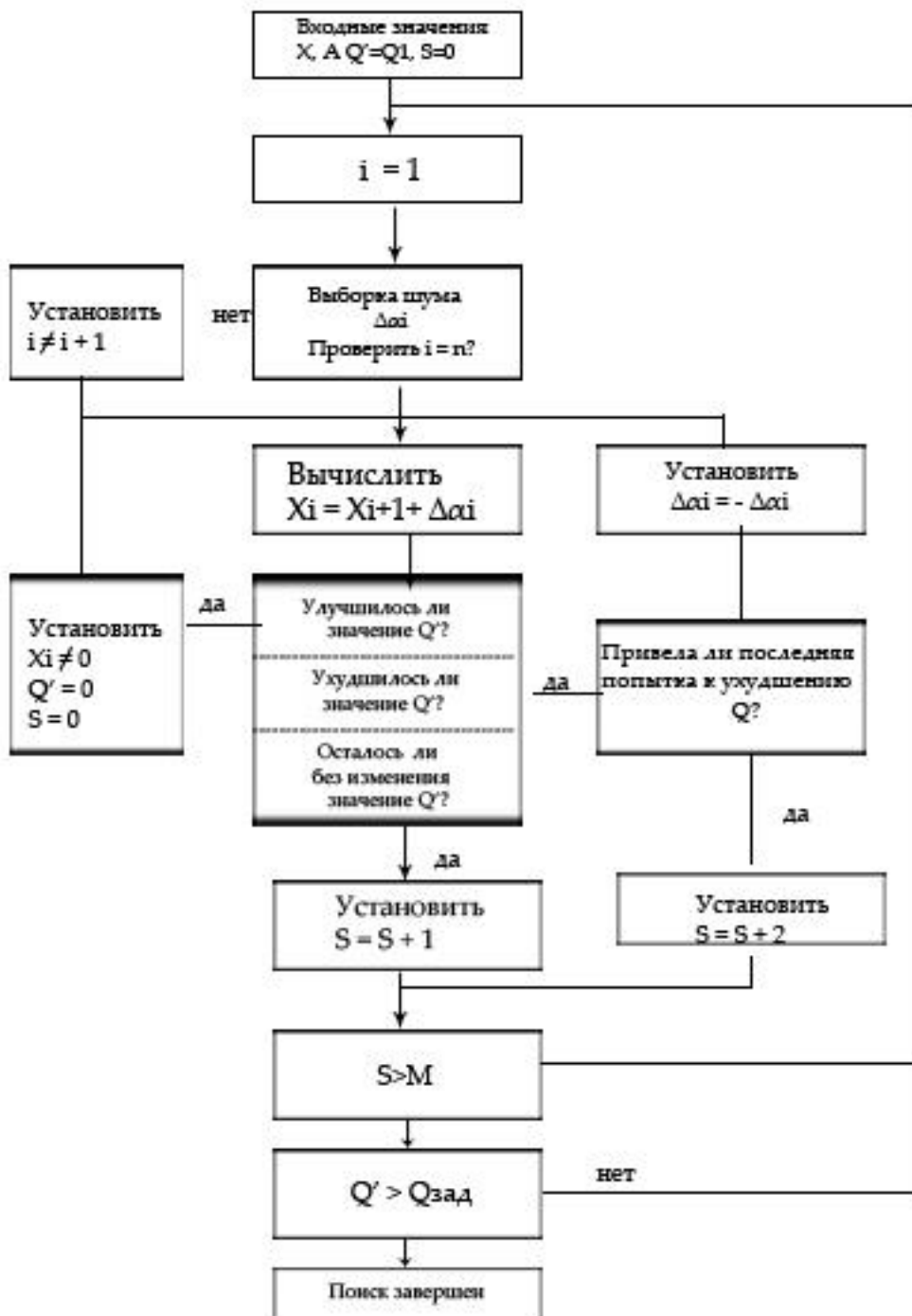


Рис.3.1. Блок-схема алгоритма случайного поиска.

Таким образом, используется стратегия абсолютного смещения в положительном и отрицательном направлениях. Блок-схема алгоритма вычисления j -го пробного шага по этой стратегии приведена на рис. 3.1. Задача оптимизации технологического процесса выращивания микроводорослей решалась на ЭВМ.

Алгоритм оптимизации многостадийного процесса культивирования хлореллы.

В предыдущем параграфе решена задача оптимизации процесса культивирования хлореллы при непрерывной регенерации потока в одном культиваторе.

Однако зачастую процесс культивирования реализуется в нескольких последовательно соединенных каскадах культиваторов, где поток непрерывно протекает из одного культиватора в другой в многостадийном переключающемся

режиме. Для оптимизации таких многостадийных процессов важно определить оптимальное время культивирования в отдельных культиваторах с тем, чтобы получить на выходе максимальную концентрацию хлореллы.

Для рассматриваемой задачи выбран критерий оптимальности вида

$$\text{где} \quad R_1 = \sum_{i=1}^N x_1, \quad (3.9)$$

$$\text{где} \quad x_1 = \frac{D_1 - \mu_i}{D_i X_{i-1}}$$

μ_i — удельная скорость роста микроорганизмов в i -ом культиваторе;

X_i — концентрация микроорганизмов в i -ом культиваторе

Для случая $I = 1$ имеем

$$X_1 = \frac{D_1 - \mu_1}{D_1 X_0}$$

Поскольку каждый исследуемый объект управления в отдельности является периодическим и многостадийным, то критерий оптимальности всей технологической системы, в которой в итоге реализуется непрерывный процесс выращивания микроорганизма представляет собой аддитивную функцию (3.9) для каждой отдельной стадии. Вектор выходных параметров любой стадии зависит только от вектора входных и управляющих параметров (3.10) любой стадии. Поэтому для решения поставленной задачи эффективен метод динамического программирования (11,20,55), в соответствии с которым *при* заданных выходных значениях процесса расчет начинается с конца. *При* этом предполагается, что оценка эффективности. Для каскада культиватора определяется следующим образом:

$$Z = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N-1; \quad Z_n = x^{(N)}$$

Пусть на управляющие переменные процесса D_i наложены ограничения

$$D^{(n)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i}} \quad (3.11)$$

При переходе от стадии к стадии на первом этапе решения задачи методом динамического программирования размерность ее увеличивается на единицу за счет ограничения типа равенства (3.11) в области изменения $D^*(89)$.

Чтобы снова вернуться к исходной разности, используется неопределенный множитель Лагранжа λ . Для оценки критерия оптимальности на каждой стадии формируются новые выражения:

$$Z^* = \lambda D_i; \quad r^* = \lambda * D_n + x^{(N)}$$

С введением неопределенного множителя Лагранжа исходной критерий видоизменяется

$$R_i^* = x^{(n)} + \frac{\lambda}{\sum_{i=1}^N 1/D} = R_1 + \frac{\lambda}{\sum_{i=1}^N 1/D_1} \quad (3.12)$$

Максимальное значение критерия оптимальности в этом случае является функцией двух величин $X^{(0)}$ и λ однако значение λ уже не связано с ограничением выбора управления на стадии. Поэтому от математической формулировки принципа оптимальности для последнего реактора многоступенчатого процесса зависит рекуррентное соотношение Веллмана

$$f(x^{(N-1)}, \lambda) = D_n \max\{\lambda D_n + \frac{D_i - \mu_i}{D_i x_{N-1}}\} \quad (3.13)$$

Изменение концентрации x_i в процессе непрерывного культивирования хлореллы описывается уравнением

$$\frac{dx_i}{dt} = D_i(x_{i-1} - x_i) + \mu_i * x_i \quad (3.14)$$

Чтобы получить значения концентрации хлореллы (3.10) для случая стационарного режима, достаточно в этом уравнении (3.14) производные по времени положить равными нулю:

$$D_i(x_{i-1} - x_i) + \mu_i * x_i = 0 \quad (3.15)$$

Значение x_i из уравнения (3.15) и оптимальное значение D_n для последнего культиватора определяем из следующего условия:

$$\frac{\delta}{\delta D_N} \left\{ \lambda D_N + \frac{D_N - \mu_N}{D_N * x_{N-1}} \right\} \quad (3.14)$$

позволяющего получить уравнение

$$\lambda + \frac{\mu_N}{D_N^2 x_{N-1}} = 0$$

Его решение таково:

$$D_n = \frac{\sqrt{\mu_N}}{\lambda * x_{N-1}} \quad (3.17)$$

Пользуясь соотношением (3.15), полученнке значения подставляем в уравнение (3.13) и имеем

$$f_1(x^{N-2}, \lambda) = D_{N-1} \max \left\{ \lambda D_{N-1} + \lambda \sqrt{\frac{\alpha_N X_N}{\lambda X_{N-1}}} + x^{(N-1)} + \frac{\sqrt{\alpha_{N-1} x_{N-1} - \mu_N}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-1} x_{N-1}}{\lambda x_N x_{N-1}}}} \right\} \quad (3.18)$$

На основе уравнения (3.10) записываем рекуррентное соотношение Беллмана для (N-1) культиватора

$$f_2(x^{(N-2)}, \lambda) = D_{N-1} \max \left\{ \lambda D_{N-1} + \lambda \sqrt{\frac{\alpha_N}{\lambda X_{N-1}}} + x^{(N-1)} + \frac{\sqrt{\alpha_{N-1} x_{N-1} - \mu_N}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-1}}{\lambda x_N x_{N-1}}}} \right\} \quad (3.19)$$

При этом

$$x^{(N-1)} = x^{(N-2)} + \frac{D_{N-1} - \alpha_{N-1}}{D_{N-1} x_{N-2}} \quad (3.20)$$

Подставляя значение $x^{(N-1)}$ в уравнение (3.19), получим

$$f_2(x^{(N-2)}, \lambda) = D_{N-1} \max \left\{ \lambda D_{N-1} + \lambda \sqrt{\frac{\alpha_{N-1}}{\lambda X_{N-1}}} + x^{(N+2)} + \frac{D_{N-1} - \alpha_{N-1}}{D_{N-1} x_{N-2}} + \frac{\alpha x_N x_{N-1}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-1} x_{N-1}}{\lambda}}} \right\} \quad (3.19)$$

Аналогично находим D_{N-1} и $f_2(x^{(N-2)}, \lambda)$ из условия (3.16):

$$D_{N-1} = \sqrt{\frac{\alpha_{N-1} x_{N-1}}{\lambda}} \quad (3.21)$$

$$f_2(x^{(N-2)}, \lambda) = \lambda \sqrt{\frac{\alpha_N x_N}{\lambda}} + x^{(N-2)} + \frac{\alpha x_N x_{N-1}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-1} x_{N-1}}{\lambda}}} + \frac{\alpha_N x_N}{\sqrt{\frac{\alpha_N x_N}{\lambda}}} \quad (3.22)$$

Для (N-2) – ого культиватора точно также можно вывести следующие уравнения:

$$D_{N-2} = \sqrt{\frac{\alpha_{N-2} x_{N-2}}{\lambda}} \quad (3.23)$$

$$f_3(x^{(N-3)}, \lambda) = \lambda \sqrt{\frac{\alpha_{N-2} x_{N-2}}{\lambda}} + \lambda \sqrt{\frac{\alpha_{N-2} x_{N-2}}{\lambda}} + \lambda \sqrt{\frac{\alpha_N x_N}{\lambda}} + x^{(N-3)} + \frac{\alpha x_{N-2} x_{N-2}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-2} x_{N-2}}{\lambda}}} + \frac{\alpha x_N x_{N-1}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-1} x_{N-1}}{\lambda}}} + \frac{\alpha_N x_N}{\sqrt{\frac{\alpha_N x_N}{\lambda}}} \quad (3.24)$$

Из уравнений (3.17), (3.23), а также с учетом выражений (3.18), (3.22), и (3.24) для произвольного i-ого реактора выводятся следующие формулы:

$$D_i = \sqrt{\frac{\alpha_i x_i}{\lambda}} \quad (3.25)$$

$$f_{N-i+1}(x^{(i-1)}, \lambda) = \lambda \sum_{j=0}^{N-i} \sqrt{\frac{\alpha_{N-j} x_{N-j}}{\lambda}} + x^{(i-1)} + \sum_{j=0}^{N-j} \frac{\alpha_{N-j} x_{N-j}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-j} x_{N-j}}{\lambda}}} \quad (3.26)$$

Пользуясь уравнениями (3.25) и (3.26) для первого реактора каскада при i=1 получаем

$$D_i = \sqrt{\frac{\alpha_i x_i}{\lambda}} \quad (3.26)$$

$$f_N(x^{(0)}, \lambda) = \lambda \sum_{j=0}^{N-i} \sqrt{\frac{\alpha_{N-j} x_{N-j}}{\lambda}} + x^{(0)} + \sum_{j=0}^{N-j} \frac{\alpha_{N-j} x_{N-j}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-j} x_{N-j}}{\lambda}}} \quad (3.27)$$

На этом первый этап решения оптимизационной задачи методом динамического программирования заканчивается, а дальнейший ход решения состоит в отыскании оптимальных значений D_i , которые в данном случае могут быть найдены как функции неопределенного множителя Лагранжа λ .

Подставляя значения из (3.27) в уравнение (3.10) для $i=1$ получаем

$$x_1 = \frac{D_1 - \mu_1}{\lambda_1 x_0} = \frac{\sqrt{\mu_1 / \lambda x_1} - \mu_1}{\sqrt{\mu_1 / \lambda x_1 x_0}}$$

По формуле (3.25) рассчитываем оптимальное значение для случая $i=2$

$$D_2 = \sqrt{\frac{\mu_2}{\lambda x_1}}$$

Подставляя найденные как функции величины D_i из выражения (3.25) в условие (3.11), определяем значения λ . В этом случае уравнение принимает вид

$$\lambda_i = \lambda^{(N)} N$$

Из этого выражения следует, что для N последовательно соединенных культиваторов общее время пребывания $T = \frac{1}{\lambda^N}$ должно распределяться одинаково по всем культиваторам, если в отдельности они имеют одинаковый объем. При $\mu = const$ имеем также $x = const$. Следовательно, для выявления времени пребывания частиц культивируемой массы в каждом культиваторе необходимо выполнить расчет на ЭВМ.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что максимальное значение концентрации хлореллы X на выходе из последнего культиватора можно выразить в виде (3.12), если иметь ввиду, что максимальное значение R^* отражается соотношением (3.28)

$$f_N(x^{(0)}, \lambda) = \lambda \sum_{j=0}^{N-i} \sqrt{\frac{\alpha_{N-j} x_{N-j}}{\lambda}} + x^{(0)} + \sum_{j=0}^{N-j} \frac{\alpha_{N-j} x_{N-j}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-j} x_{N-j}}{\lambda}}}$$

$$D^{(N)} = \frac{1}{\sum_{j=0}^N * \frac{1}{D_i}} = \frac{1}{\sum_{j=0}^N * \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_i}{\lambda x_i}}}}$$

Откуда

$$\lambda = \frac{1}{(D^{(N)} \sum_{j=0}^N * \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_i}{\lambda x_i}}})^2}$$

Найденные значения λ подставляем в уравнения (3.25) и получаем скорость разбавления для произвольного i -ого культиватора в виде

$$D_i = D^{(N)} \sqrt{\alpha_i * x_i} \left(\sum_{j=0}^N * \sqrt{\frac{x_i}{\mu_i}} \right) \quad (3.29)$$

При $\mu_i = const$ и $x_i = const$ уравнение (3.29) принимает следующий вид:

$$D_i = D^{(N)} * N \quad (3.30)$$

или

$$D_i = \frac{1}{T} N, \quad i = \overline{1, N} \quad (3.30)$$

Разработка алгоритмов оперативного прогнозирования и автоматического управления процессом культивирования хлореллы

Как отмечалось выше, для процесса культивирования хлореллы необходимо поддержание в требуемом соотношении составов стандартных питательных веществ (это могут быть среды 04, 05 и т.д., используемые как в обычных лабораторных, так некоторых производственных условиях). Однако следует заметить, что используются также и нестандартные питательные вещества, в которых содержатся в различном соотношении субстраты, необходимые для роста культуры. Поэтому при создании эффективных систем управления одной из важных задач, стоящих перед разработчиками, является разработка алгоритма оперативного прогнозирования и управления, учитывающего эти особенности.

Данный алгоритм должен обеспечивать своевременное и надежное прогнозирование хода технологического процесса, возможность вычислять управляющие воздействия в виде команд, подаваемых на исполнительные механизмы с помощью ЭВМ, а также заблаговременно оповещать о различных непредвиденных и аварийных производственных ситуациях. При этом важен точный учет состава и содержания питательных веществ.

Рассмотрим вопрос выбора или приготовления заданного состава питательных веществ.

Общий объемный расход приготавливаемой питательной среды для культивирования хлореллы составляет

$$V_j = \sum_{j=1}^J V_j \quad (3.31)$$

где V_j - объемный расход j -ого питательного вещества.

В качестве питательных веществ могут выступать минеральные вещества (P, N, CO₂, Mg, K,...) и др.

Основным фактором, влияющим на культивирование хлореллы, является содержание питательных веществ субстрата. Но, кроме того, также необходимо учитывать температуру, pH, цвет и ряд других физико-химических факторов. Вычисление управляющих воздействий производится в

зависимости от режима ведения процесса, выбранного соотношения или сорта питательных веществ. Сочетание питательных компонент $j = l$ заранее устанавливается в зависимости от содержания питательных веществ в среде

$$Q_{jj} = \{Q_{j1}, Q_{j2}, \dots, Q_{jl}\} \quad (3.32)$$

Комбинация содержания выбирается из условия

$$Q_{ji} = \begin{cases} 0, & \text{если } Q_{ji} = 0 \\ 1, & \text{если } Q_{ji} \neq 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

Обменный расход по каждому веществу равен

$$V_j = \frac{G}{S_j} \quad (3.34)$$

Расход j -ого питательного вещества можно выбирать в зависимости от перерабатываемой среды:

$$V_{j\text{соли}} = \frac{\alpha_j G_{j\text{суб}}}{S_{j\text{соли}}}, \quad (3.35)$$

где α_j – коэффициент пропорциональности;

$S_{j\text{соли}}$ – концентрация используемых веществ (N, Mg, P, CO₂, Cl₂ и т.д), кг/м³.

Концентрация компонентов, входящих в состав питательных веществ, устанавливается заранее. По мере появления необходимости в увеличении компонентов того или иного вида вещества коэффициент α_j корректируется. Общий расход питательных веществ на дальнейшую переработку при j -ом сочетании субстратов следующий:

$$V_j = \sum_{i=1}^l G_j - G_j - \text{потери}, \quad (3.36)$$

где G_j - расход j -ого питательного вещества, кг/ч;

G_j - потери j -ого вещества при переработке, кг/ч.

Считая, что величина G_j - потери зависит от общего перерабатываемого G , уравнение (3.36) запишем в следующем виде:

$$V_j^0 S_j^0 = \sum_{i=1}^l V_{jk} - q V_j^0 * S_j^0 \quad (3.37)$$

где S_{jk} - концентрация y -ого питательного вещества, кг/м³.

q - коэффициент, учитывающий потери субстрата;

V_j^0 - объемный расход свежего j -ого питательного вещества на входе, м/г³;

S_j^0 - концентрация свежего y -ого питательного вещества на входе, кг/м³

$$S_j^0 = \sum_{i=1}^l \frac{V_{jk} S_{jk}}{(1+q)V_j^0} \quad (3.38)$$

Объемный расход свежего питательного вещества на входе в j -ый культиватор равен:

$$V_j = \sum_{i=1}^l V_{jk} \quad (3.39)$$

Необходимая концентрация питательных веществ достигается путем управления расходом в соответствии с соотношением:

$$V_{ij} = \frac{(S_j^0 - S_j) V_j^0}{S_j}, \quad (3.40)$$

где S_j - концентрация субстрата после разбавления, кг/м³.

С учетом формул (3.39) и (3.40) расход воды может быть рассчитан следующим образом:

$$V_{вода} = \frac{\sum_{i=1}^l V_{ik} S_{ik} - (1+q)(\sum_{i=1}^l V_{ik}) S_j}{(1+q)S_j} \quad (3.41)$$

Оптимальная температура неоднородной среды, расходуемой на процесс культивирования, устанавливается путем управления расходом воды, поступающей в теплообменник для охлаждения питательной среды

$$T_k = \frac{V_j C_{cp} T_H W_6 C_6 (t_2 t_1)}{V_j C_{cp}} \quad (3.42)$$

где W_6 - расход воды на охлаждение, м³/г;

C_{cp}, C_6 - удельные теплоемкости воды и питательных веществ;

t_1, t_2 - начальная и конечная температура воды, °С;

V_j - объемный расход питательной среды при j - ом сочитании субстратов, м³/г;

В тех случаях, когда значения выходных показателей процесса резко отличаются от регламентных границ, управление процессом может быть осуществлено путем расчета по аналитическим или эмпирическим зависимостям, учитывающим комплексные выходные показатели процесса.

Расход питательной среды определяется из следующей зависимости:

$$V_{j0} = S_{j0} \sqrt{\frac{Z(C_j^* - C_j)X}{C_j^* x^*}}, (3.43)$$

где C_j, C_j^* – оптимальные и текущие значения питательных веществ в культиваторе, кг/м³,

x^* и x - оптимально и текущие значения концентрации микроорганизмов в культиваторе, кг/м³,

V_{j0} - текущий объемный расход питательной среды в культиваторе, мг³/г.

Управляющие воздействия, вычисленные на основе приведенных выше формул, используются для настройки системы управления, реализующей принятый закон управления.

Алгоритм управления процессом культивирования хлореллы приведен на рис. 3.2 и состоит в следующем:

- 1) Определяется вектор X_j текущих значений переменных V_j, S_j, T_k, P_{jq} и путем решения оптимизационной задачи находятся оптимальные значения $V_j^*, S_j^*, T_k^*, P_{jq}^*$,

где P_{jq}, P_{jq}^* - текущие и оптимальные значения q -ого компонента в минеральной соли.

- 2) Проверяется соответствие переменных X_j некоторым условиям

$$\bar{X}_j \leq X_j \leq \tilde{X}_j (3.44)$$

где X_j, \tilde{X}_j – нижние и верхние пределы изменения управляемых переменных.

- 3) Проверяется соответствие выходных показателей не которым условиям

$$\bar{Y}_j \leq Y_j \leq \tilde{Y}_j (3.45)$$

где \bar{Y}_j, \tilde{Y}_j - нижние и верхние пределы изменения выходных показателей. В случае невыполнения этого условия система управления автоматически отключается и выдает аварийный сигнал.

4) В случае $|Y_j^* - Y_j| \leq \sigma$ принимается $X_j = X_j^*, U_j = U_j^*$ и управление по соответствующим каналам при j -ом сочетании субстратов не меняется (σ - заданная точность модели).

5) При $|Y_j^* - Y_j| \leq \sigma$ рассматриваются такие условия:

а) когда $|X_j^* - X_j| \leq \varepsilon$ - заданная точность управляемых переменных), то необходимо проводить идентификацию коэффициентов модели, а затем приступить к решению оптимизационной задачи;

б) если $|X_j^* - X_j| > \varepsilon$ то вычисляются величина разбаланса $\Delta X_j = X_j^* - X_j$ и соответствующие воздействия. Суммируя найденное значение с текущим U_j , определяют величину управляющего воздействия

$$U_j = U_j + \text{sign}(\Delta U_j) \quad (3.46)$$

Данный алгоритм позволяет при заданных производственных условиях и составе питательных веществ повысить производительность выработки целевого продукта, а также заблаговременно предотвратить различные непредвиденные и аварийные производственные ситуации.

ГЛАВА 4. РЕАЛИЗАЦИЙ РАЗРАБОТАННЫХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРМОВ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ ХЛОРЕЛЛЫ

Функционально-алгоритмическая структура систем управления

При автоматизации микробиологических процессов и производств на основе применения современных методов, принципов и приемов теории автоматического управления, ориентированных на использование средств управляющей вычислительной техники, появляется необходимость решения по-новому ряду вопросов, связанных с алгоритмизацией исходных задач. Применение методов моделирования и алгоритмов оптимального управления способствует научно-обоснованному выбору эффективных способов представления информации, обоснованию состава и структуры технических средств.

Функционально-алгоритмическая структура системы управления должна быть синтезирована с учетом эффективности решаемой задачи (отношение ценности полученной информации к затратам).

При построении системы управления решаются задачи: сбора и первичной переработки информации, прогнозирования хода технологических процессов, оптимизации режимных параметров, управления технологическим процессом и т.д.

В рамках этих основных задач могут быть найдены решения, которые позволяют облегчить оператору-технологу оперативное управление или реализовывать в зависимости от различных производственных ситуаций принятие разумных управленческих решений. Для рассматриваемого класса объектов (технологический процесс культивирования микро во до рослей) задача синтеза систем управления заключается в поддержании технологического процесса неоптимальном уровне, отвечающем технологическим и экологическим нормам производства.

Одно из необходимых условий оптимального ведения процесса культивирования микроорганизмов - автоматический контроль качества и состава питательных веществ на входе, а также контроль выходных показателей процесса. Однако из-за отсутствия серийных датчиков в настоящее время используются локальные системы автоматического контроля и управления, призванные стабилизировать входные и выходные потоки.

При оптимальном же управлении необходимо контролировать и воздействовать на всю совокупность факторов, влияющих на функцию цели.

На практике управляющие воздействия $Y = F(Z, U^*)$ отличаются от требуемых U^* на величину

$$\delta U^* = F(Z, U^*) - \varphi^*$$

где F - функция.

Очевидно, что коррекция управления δU должна минимизировать эту величину. Иными словами, для синтеза коррекции δU необходимо решить минимизационную задачу

$$Q(\delta U) = |F(Z, U^* + \delta U) - Y^*| \min \delta U \in R,$$

где R - ресурсы, выделяемые на коррекцию.

Синтезируемая на основе предложенных математических моделей система управления процессом культивирования хлореллы должна решать следующие задачи:

- подбора оптимального состава питательных веществ (скорости разбавления среды в культиваторе);
- определения продуктивности культиватора;
- стабилизации текущих концентраций хлореллы и питательных веществ в культиваторе и т.д

При управлении следует минимизировать невязку между требуемым изменением выхода объекта $Y^*(t)$ в процессе управления и тем, что получается при управлении в среде $Z(t) \neq \hat{Z}(t)$,

где $\hat{Z}(t)$ - прогноз поведения среды.

Эта задача имеет вид

$$\int_0^T [F(t), U^*(t) + \delta U(t) - Y^*(t)]^2 \rightarrow \min \delta U(t) \in R$$

Возрастающие требования к качеству управления процессом культивирования хлореллы обуславливают необходимость построения систем на основе алгоритмов адаптивного управления.

Предлагаемая система оптимального управления процессом культивирования хлореллы изображенная на рис. 4.1 и реализующая комплекс алгоритмов управления, решает следующие задачи:

- сбора и первичной переработки информации; вывода текущих значений контролируемых переменных по вызову оператора;

- своевременного прогноза о ходе технологических процессов;
- оптимизации состава питательных сред;
- нахождение оптимальных режимных переменных;
- реализации управленческих решений;
- ситуационные анализ и прогнозирование результатов процесса.

Для реализации систем управления необходимо также решить следующие связанные с техническим обеспечением задачи;

- совершенствование работы локальных систем контроля и регулирования (рН, Т, свет и т.д.);
- управление составом питательных веществ, непрерывная циркуляция среды и т.д.

Периодичность решения задач управления устанавливается в зависимости от технологических особенностей, объекта управления, режима введения процесса, а также от наличия комплекса технических средств.

Система управления процессом приготовления питательных веществ

Рост и развитие микроводорослей прежде всего зависят от состава и концентрации питательных сред. При культивировании хлореллы в качестве питательных веществ обычно применяются соли KNO_3 , KH_2PO_4 , $MgSO_4$ и др. Содержание их в культивируемой среде колеблется в широких пределах, но повышение их кон- цен, рации не оказывает отрицательного влияния на скорость роста хлореллы.

При оптимальном управлении процессом культивирования микроводорослей также необходимо учитывать быструю приспособляемость последних к различным концентрациям солей в питательном растворе. При культивировании хлореллы большое значение имеет состав и количество микроэлементов. Поэтому, следует определить оптимальное содержание и состав питательных веществ, создающих благоприятные условия для роста и развития микроорганизмов.

В лабораторных и некоторых производственных условиях там, где есть возможность приготовления и транспортировки при выращивании хлореллы пользуются стандартными питательными средами (типа 0,4, Тамийя, Майерса, Ленинградская и т.д.)

Обычно же на многих полупромышленных и производственных объектах, где практикуется многолетнее культивирование хлореллы, стандартными средами не пользуются, это связано с отсутствием специальных производств, ориентированных на приготовление стандартных сред, дороговизной и трудностями их транспортировки.

В связи с этим многие хозяйства сами приготавливают питательные вещества в необходимом количестве. Состав же их зависит от наличия питательных солей. С этой целью добавляется раствор микроэлементов, необходимы/ для роста культуры.

Рассмотрим способы приготовления питательных сред и систему управления, призванную повысить точность и качество приготавливаемой питательной среды и изображенную на рис. 4.2.

Система приготовления питательной среды, необходима для выращивания хлореллы, содержит: смеситель - 1 для приготовления питательной среды, измерительные датчики расхода воды и растворов солей (KNO_3 , KH_2PO_4 , KNO_3)- 58,11, а также датчик расхода раствора микроэлементов - 14, датчики концентрации растворенных питательных веществ 15-19. Вся необходимая информация поступает на вход вычислительного устройства - 20 для обработки и выработки управляющих воздействий (6).

Датчики 2,5,8,11 вырабатывают информацию текущих значений расходов воды и растворенных питательных веществ (KNO_3 , KH_2PO_4 , KNO_3), а датчики 15-19 - о концентрации питательных солей.

Вычислительное устройство обрабатывает поступившую информацию и на основе математической модели с применением одного из методов оптимизации определяет величину оптимального расхода питательных веществ. Для этого необходимо заранее располагать сведениями о значении концентрации солей.

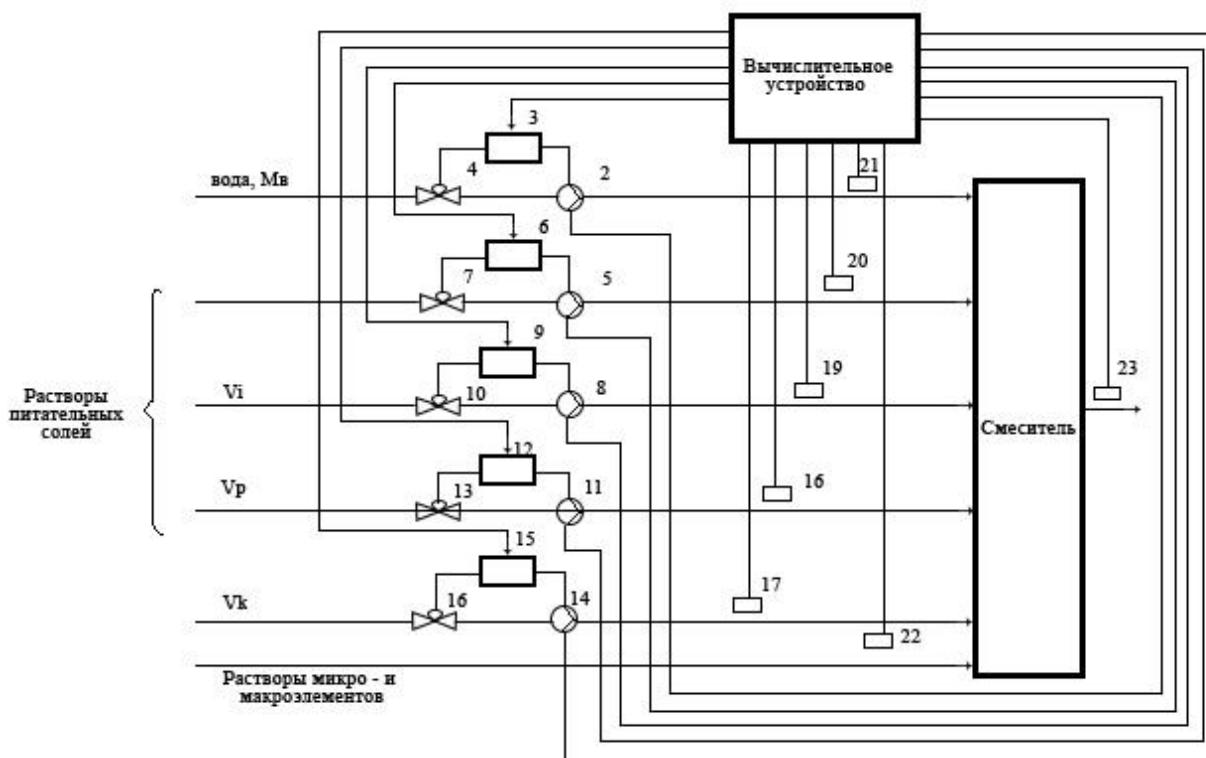


Рис.4.2. Система управления процессами приготовления питательной среды.

Величины оптимального расхода питательных веществ, воды, растворов солей, микроорганизмов и микроэлементов определяются, исходя из следующих соотношений:

$$V_k = \frac{V_p S_k}{C_k};$$

$$V_i = \frac{V_p S_i}{C_i}; \quad i = \overline{1, n};$$

$$V_B = V_p \left(1 - S_k / C_k - \sum_{i=1}^n S_i / C_i \right).$$

Поддержание оптимального значения рН питательной среды в линии подачи аммиачной воды осуществляется установленными исполнительными механизмами, на которые поступают сигналы управляющих воздействий, вырабатываемые вычислительным устройством (рис.4.2).

Предложенный способ приготовления среды для культивирования микроводорослей позволяет повысить скорость роста и улучшить условия развития хлореллы за счет создания благоприятных режимов в культиваторе при вариации значений рН среды, состава питательных солей и т.д.

Система управления процессом культивирования хлореллы

В предыдущем параграфе дано описание системы приготовления питательной среды, которая позволяет повысить точность и выдерживать необходимое соотношение питательных компонентов и качество подготавливаемой питательной среды.

Приготовленная питательная среда накапливается в смесителе, откуда в требуемом количестве подается в культиватор 25.

Предложенная система автоматического управления культивирования хлореллы, которая представлена на рис.4.3, призвана обеспечить повышение производительности культиватора. Она содержит контур регулирования подачи питательных веществ на вход культиватора 25. Этот контур состоит из датчика расхода 26, соединенного с регулятором 27, выход которого связан с исполнительным механизмом 28, установленными на линии подачи питательных солей.

Предложенная система также содержит контур регулирования температуры среды в культиваторе 25, состоящий из датчика 29 температуры, соединенный с регулятором 30, выход которого связан с исполнительным механизмом 31, установленным на линии подачи хладагента, подаваемого в охладительную рубашку 32.

Поскольку процесс культивирования хлореллы протекает при непосредственном участии CO_2 , на линии подачи CO_2 установлен датчик концентрации CO_2 33, соединенный с регулятором 34, выход которого связан с исполнительным механизмом 35. Система содержит также датчик pH (36), концентрации хлореллы (37) и ингибитора (38), а также фоточувствительный элемент (39), который через вычислительное устройство связан с исполнительным механизмом. На выполненное устройство также поступает информация от других датчиков (например, от датчика уровня 40 и т.д.).

Вычислительное устройство подключено к датчикам концентрации хлореллы и ингибитора, датчикам температуры и уровня к фоточувствительным элементам и т.д. Выход вычислительного устройства соединен с исполнительным механизмом контура регулирования подачи холодной воды, питательных сред.

Вычислительное устройство позволяет своевременно прогнозировать показатель производительности установки и вырабатывает управляющие воздействия, подаваемые на исполнительные механизмы, что обеспечивает необходимые условия для реализации оптимального процесса. В результате

достигается увеличение производительности культуры и выхода хлореллы с единицы питательных солей (V_{nc}).

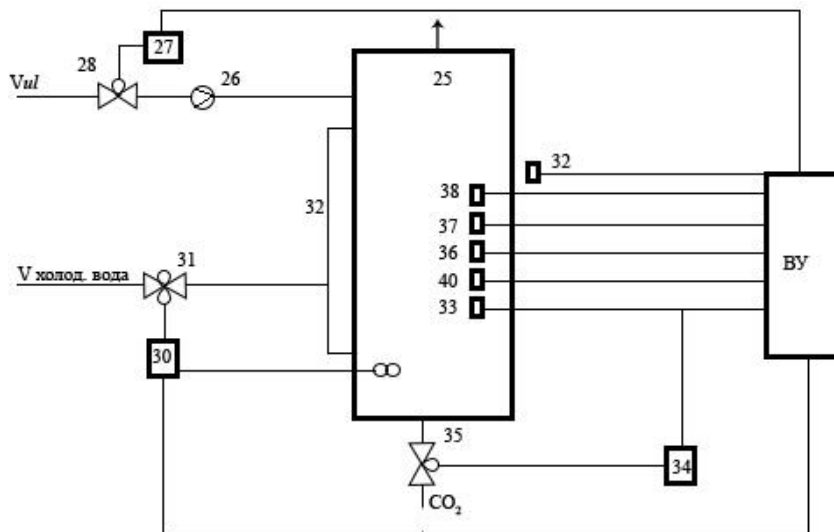


Рис.4.3. Система автоматического управления процессом культивирования хлореллы.

Увеличение объемного расхода питательных солей (V_{nc}) выше уровня допустимого предела (скорость роста хлореллы меньше, чем дебит) приводит к постоянному выливаю хлореллы из культиватора, что чревато потерями питательных солей, уменьшающими производительность технологической установки.

На основе текущих значений T , pH , N , V_{nc} и т.д., поступающих в вычислительное устройство с датчиков 26,29,33,36,37,33, 39 и др., производится вычисление удельной скорости роста хлореллы в культиваторе

$$\mu = \frac{\mu_p S}{K_S + S} * \frac{I}{K_I + I} - \left[\frac{(pH - pH_{опт})^2}{\sigma_{pH}^2} - \frac{(T - T_{опт})^2}{\sigma_T^2} - \frac{(C - C_{опт})^2}{\sigma_C^2} \right].$$

Поскольку процесс культивирования хлореллы осуществляется в режиме непрерывного циркулирования, среднее время пребывания частиц среды в пределах одного цикла составляет

$$\tau = \frac{V}{v},$$

V - объем культиватора, m^3

v - скорость потока на входе и выходе из культиватора, $m^3/г.$

Информация об изменении условий использования штампа хлореллы или качество применяемых питательных солей, фиксируемая по экспериментально определенным коэффициентам соответствующих уравнениях модели вводится в вычислительное устройство.

Хромостатный режим культивирования хлореллы осуществляется при условии $\mu = D$, т.е. когда исходная концентрация хлорелл остается постоянной на протяжении всего процесса. Вычислительное устройство

производит вычисление на основе уравнения и определяет величину рассогласования

$$\sigma = \mu - D$$

В зависимости от значения σ вычислительное устройство вырабатывает соответствующее управляющее воздействие, подаваемое на исполнительный механизм 28, установленный на линии подачи растительных солей в культиватор и обеспечивающий изменение $V_{\text{пс}}$ на величину $\Delta V = \sigma * H * Q$, где Q – сечение зоны протока питательной среды.

Производительность культиватора определяется из выражения

$$B = \mu x + H * Q = V^* X,$$

где V^* - расчетное значение расхода питательных солей, м³/с.

Таким образом, вычислительное устройство на основе обработки информации поступающих с датчиков и на базе результатов лабораторных анализов рассчитывает основные показатели процесса культивирования хлореллы, в том числе и значения μ и V^* . При этом управляющее вычислительное устройство прогнозирует ход процесса культивирования по данным таких параметров, как X , рН, Т, СО₂ и т.д., одновременно вычисляя V и как итоговый результат определяет производительность культиватора, когда скорость протока равна скорости стока при непрерывном культивировании. Вычислительное устройство помогает своевременно прогнозировать, а также вычислять значения B и вырабатывать управляющие воздействия на механизм 28, что обеспечивает оптимальное управление расходом питательных солей $V_{\text{пс}}$.

Увеличение расхода питательных солей $V_{\text{пс}}$ по сравнению с V^* приводит к удалению изменения культуры, потерям питательных солей и в итоге – к уменьшению производительности аппарата и снижению выхода хлореллы с единицы питательных солей. В случае уменьшения расхода питательных солей, наблюдается снижение концентрации X и, следовательно, уменьшение производительности культиватора.

Проведенные в культиваторе объемом в 10 м³ опытно-экспериментальные исследования по выращиванию хлореллы в среде 04 питательных солей показали, что $N = 10 \text{ мг/л} \div 45 \text{ мг/л}$; $P = 5 \div 14 \text{ мг/л}$.

Начальная концентрация засевной хлореллы составляет 3-4 млн/л, а максимальное значение достигало 80-10 млн/л. Содержание подаваемого в культивированную среду СО₂ 25-30 мг/л, рН среды составляла 6-8, объемный расход среды был равен 1,4 м³/сутки. При этом удельная производительность составила 150 мг/л. сутки.

Температура среды в культиваторе поддерживалась равной 25 – 30°C, освещенность среды составляла 17-30 тыс.люкс.

В результате реализации предложенной системы управления максимальное отношение концентрации хлореллы от ее среднего значения уменьшилось на 23,8%.

Таким образом, система управления процессом культивирования хлореллы обеспечивает своевременное прогнозирование хода технологического процесса и формирование с помощью вычислительного устройства управляющих воздействий, что способствует повышению производительности культиватора на 8-12%.

Применение алгоритмов для повышения эффективности системы контроля и управления процессом культивирования хлореллы.

Применительно к запросам технологического процесса культивирования хлореллы необходимо оценить эффективность процедур стабилизации основных параметров (состава питательных веществ, (физико-химических и биологических переменных, а также качества и количества выходного продукта). При этом приходится решать дилемму: выбрать ли дорогостоящую систему контроля и управления, но обеспечивающую требуемую достаточно жесткую стабилизацию параметров процесса или предпочесть систему меньшей стоимости, но уступающую первой по точности.

Подобная задача имеет место и при выборе средств контроля по технологическими параметрами. При этом необходимо найти наиболее приемлемое соотношение между точностью и стоимостью контрольно-измерительной аппаратуры. Кроме того, необходимо также иметь в виду и вопросы алгоритмизации, т.е. процесса автоматизации всех этапов и процедур математического моделирования и относящихся к анализу, синтезу, проектированию, диагностике и прогнозированию хода производственного процесса. Все это требует решения ряда научно-исследовательских задач, связанных с обследованием объекта управления, составлением математического описания, проведением экспериментальных исследований по установлению коэффициентов и параметров модели, решением оптимизационных задач и с разработкой алгоритмов контроля и управления и т.д. В конечном итоге разработан комплекс прикладных программ решения задач моделирования и управления, которые потребовали, в свою очередь, значительных затрат.

Исходя из отмеченного, представляется целесообразным оценить экономическую эффективность разработанных систем, контроля, прогнозирования и управления качеством и составом технологических сред и оптимального выбора технических средств контроля и управления. Требование стабилизации сводится к поддержанию параметров (качество и содержание выпускаемой хлореллы, а также ее биологического активного состояния, позволяющего обеспечивать продуктивным рост и размножение микроорганизмов в заданных пределах) при одновременном соблюдении экологических норм производства.

При этом система прогнозирования и управления должна обеспечить надежную и оперативную оценку годности выпускаемого целевого продукта по показателям содержания в культуре белка, жиров и т.д.

Для построения и реализации систем управления предварительно были обработаны на ПЭВМ полученные математические модели кинетики (2.1) модели гидродинамической структуры потоков в культиваторе (2.2), отработаны методики определения параметров модели (2.3), алгоритмы прогнозирования хода технологического процесса и управления (3.5).

Испытания полученных моделей и алгоритмов управления в составе систем управления (СУ) проводились первоначально на лабораторной установке, Института микробиологии АН РУз. Далее экспериментальное подтверждение эффективности алгоритмов, входящих в состав математического обеспечения предложений СУ, получено также в производственных условиях.

В качестве технической протокол предложенной систем управления выступает комплекс технических средств, состоящий из конкретных контрольно-измерительных приборов, систем локального автоматического регулирования и управления, ПЭВМ, а также устройства связи с объектом.

Система автоматического регулирования и контроля своевременно осуществляет контроль и стабилизацию на заданном значении управляющих параметров, а также передает информацию для реализации моделей и алгоритмов прогнозирования и управления ходом технологического процесса.

Необходимое проведение опытов установлено равным одному месяцу. Такой вывод сделан, исходя из анализа особенностей конкретного технологического процесса с учетом требований регламента, опыта эксплуатации систем управления, а также с учетом времени, которое необходимо, чтобы получить ощутимый технико-экономический эффект от внедрения системы управления. При этом расчет экономической эффективности осуществлялся путем учета собственно экономического

эффекта (увеличение выхода хлореллы из единицы затраченных питательных веществ, сокращение излишнего расхода питательных веществ на рост и размножение хлореллы, а также на поддержание жизнедеятельности культуры, повышение производительности культиватора и т.д., достигаемого на отдельных этапах реализации СУ).

Рассмотрим методику проведения испытаний СУ технологическим процессом культивирования хлореллы.

Для сбора, хранения и обработки информации о состоянии объекта были реализованы следующие системы.

- регулирования расхода питательных веществ
- регулирования и контроля температуры среды;
- регулирования рН среды;
- контроля уровня;
- контроля освещенности;
- контроля содержания питательных веществ;
- контроля содержания растворенного CO_2 в среде.

Дебит питательных веществ определяется по показаниям расходомеров, установленных на линии подачи питательных веществ, а также по уровнемеру.

При решении задачи оптимизации и управления значения концентрации хлореллы, скорости роста, содержания питательных веществ и другие показатели принимались по результатам решением систем уравнений предложенной модели (2.21).

В процессе проведения экспериментов некоторые значения параметров определялись путем лабораторных анализов. При этом отбор проб производился через каждый час, включая время взятия проб и проведения лабораторных анализов.

Реализация СУ на основе разработанных математических моделей, алгоритмов оптимизации и управления, а также апробированных программных комплексов позволила увеличить выход хлореллы из единицы затраченных питательных веществ, повысить производительность культиватора за счет оптимального поддержания значения дебита и т.д.

Характер изменения основных характеристик процесса культивирования хлореллы (расход питательных веществ G_i , концентрация хлореллы X , содержание CO_2 при ручном управлении, с локальной системой автоматического регулирования и контроля), имеющих место при работе СУ на основе предложенных моделей и алгоритмов.

Анализ испытаний систем управления позволяет сделать следующие выводы:

- 1) Система позволяет надежно стабилизировать расход питательных веществ.
- 2) При функционировании СУ основные показатели процессов (N, P, CO², T, Ph, C, V) и другие не выходили за пределы допущенных границ, а время до регенерации (использования хлореллы в качестве засевного материала) увеличено более чем в 2 раза.
- 3) Система управления позволила повысить технико - экономические показатели производства, обеспечив увеличение выхода хлореллы на единицу затрачиваемого субстрата в среднем на 18%.

На основе полученных результатов можно сделать заключение об адекватности предложенных моделей реальному процессу, о правильности выбранных управляющих воздействий и критериев, а также о работоспособности разработанных алгоритмов оптимизации. Таким образом, система управления процессом культивирования хлореллы дает возможность улучшить качество управления и повысить общую культуру экономического планирования и анализа за счет использования более достоверной и своевременной информации о ходе протекания сложного технологического процесса, а также за счет более рационального использования имеющихся ресурсов (сырья, полезного объема культиватора и т.д).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в рамках данной работы, получены следующие основные результаты:

1. Критический анализ современного состояния теории и практики моделирования и управления микробиологическими процессами на основе применения современных методов, принципов и алгоритмов теории оптимального управления с использованием средств вычислительной техники свидетельствует о необходимости пересмотра ряда вопросов, связанных с алгоритмизацией комплекса решаемых задач. Такой подход должен способствовать научно обоснованному выбору способов представления информации для прогнозирования хода технологических процессов, оптимизации режимных параметров и оптимального управления ходом протекания технологического процесса.
2. Анализ особенностей производства микроводорослей как объекта моделирования и управления показал, что недостаточно разработаны математические модели, позволяющие учитывать физико-химические, биотехнологические и гидродинамические закономерности исследуемых явлений. Это объясняется малой изученностью конкретных особенностей производства, многообразием типов культиваторов, значительным

количеством факторов, влияющих на процесс, недостатком информации о ферментативной кинетике, реальной гидродинамической обстановке в аппарате и о закономерностях тепло- и масса- обмена, а также о биотехнологических закономерностях, обусловленных скоростью размножения микроорганизмов.

3. При моделировании процесса культивирования микроводорослей целесообразно строить аналитическую модель на основе физико-химических, биологических, гидродинамических; массообменных закономерностей, что призвано способствовать более точному прогнозированию процесса роста и размножении микроводорослей и решению задач, связанных с проектированием новых, культиваторов, оптимизацией существующих процессов и их автоматическим управлением.

4. Результаты моделирования на ЭВМ позволили количественно оценить затраты питательных веществ, необходимых для роста и размножения микроводорослей, установить необходимую скорость отбора культуры из культиватора, с необходимой точностью определить скорость роста микроорганизмов с учетом факторов, непосредственно влияющих на процесс культивирования.

5. Выполнен анализ возможных режимов культивирования микроводорослей, даны два вида алгоритмов оптимизации. В первом варианте рассмотрен алгоритм оптимизации процесса культивирования микроорганизмов при непрерывной регенерации в одном культиваторе. Вторая задача оптимизации решается на основе предложенных алгоритмов выбора оптимального времени пребывания хлореллы в культиваторах в ходе реализации многостадийного технологического режима.

6. Разработанный алгоритм прогнозирования и управления процессом культивирования хлореллы позволяет при заданных производственных условиях и составе питательных веществ повысить производительность и качество целевого продукта, а также заблаговременно предотвращать различные непредвиденные и аварийные производственные ситуации.

7. На базе разработанных моделей и алгоритмов предложена функционально-алгоритмическая структура системы управления процессом культивирования хлореллы, ориентированной на решение следующих задач: сбор и первичная обработка информации, прогнозирование хода технологического процесса, оптимизация режимных параметров и управление ходом технологического процесса.

8. Реализация системы управления позволила повысить выход хлореллы из единицы затраченных питательных веществ, увеличить производительность

культиватора за счет строгого поддержания оптимального значения времени пребывания частиц субстрата в аппарате.

9. Полученные результаты позволяют сделать заключение об адекватности построенных моделей реальному процессу, правильности выбранных управляющих воздействий и критериев оптимальности, а также о работоспособности и эффективности разработанных алгоритмов оптимизации и управления технологическим процессом производственного культивирования хлореллы.

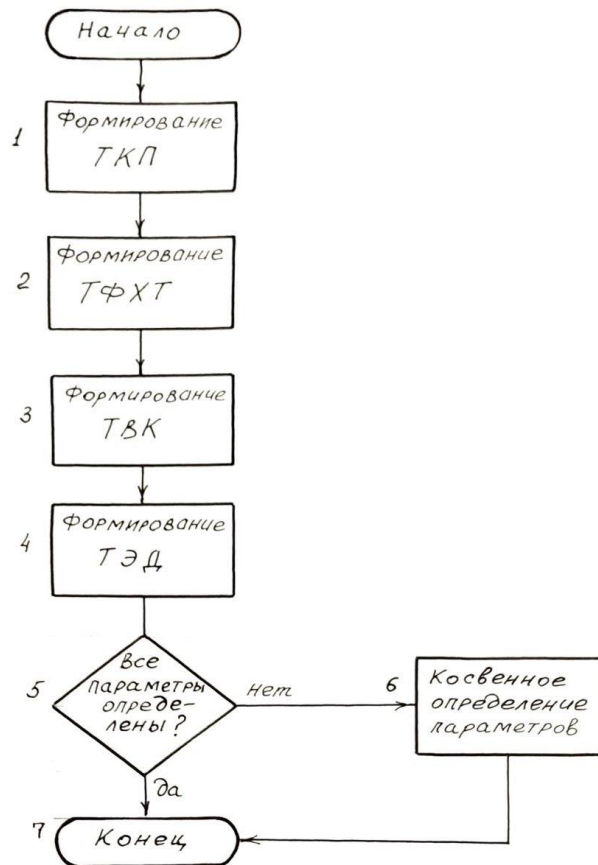
Приложение I

Алгоритм выбора основных факторов

Биохимические объекты отличаются сложностью, нестационарностью, большим количеством факторов, влияющих на ход процесса. В I.I мы сформировали общий вид математической модели (ММ), описывающей рассматриваемые процессы. Теперь на основании сделанных в I.I выкладок необходимо найти способ упрощения и размерности исходной полной системы уравнений. Для этого необходимо организовать выбор такой группы факторов, с помощью которых можно было бы адекватно описать исследуемый объект с наименьшими затратами. В связи с этим введем понятие минимально необходимой группы факторов (МНГФ).

Минимально-необходимой группой факторов, с помощью которой можно адекватно описать исследуемый объект и при удалении любого фактора из этой группы из числа рассматриваемых. При этом адекватность не нарушается. Такую минимально необходимую группу факторов будем искать следующим образом, выявить всю вводимую информацию и далее сформировать массивы данных для работы системы.

Рассмотрим отдельные алгоритмы, необходимые для формирования математической модели рассматриваемого объекта.



АЛГОРИТМ I. Ввод данных и формирование таблиц.

Этот алгоритм предшествует работе всех других алгоритмов, так как именно с помощью этого алгоритма формируются все необходимые для работы системы таблицы. Сюда входят все данные, снятые с объекта и вся имеющаяся априорная информация, прямые и косвенные методы определения параметров, данные, необходимые для вычисления таблицы.

1. Формирование ТКП (таблица

конструктивных параметров).

- Формирование ТФ-ХТ (таблица физико-химических и термодинамических параметров).

- Формирование ТВК (таблица вычисляемых коэффициентов).

- Формирование ТЭД (таблица экспериментальных данных).

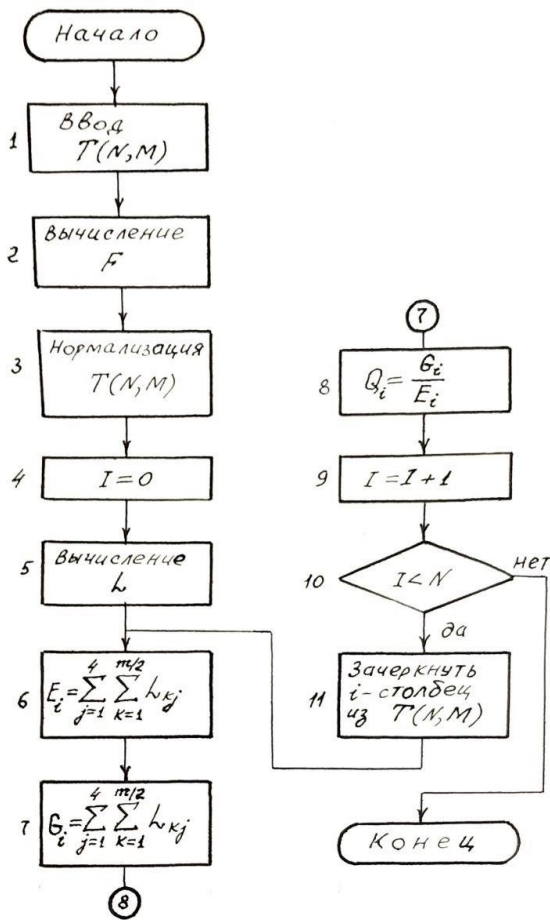
- Все ли необходимые параметры определены (имеются в таблицах)?

если да, то переход на конец (п.7),

если нет, то переход на (п. 6).,

- Алгоритм косвенного определения параметров. С помощью этого алгоритма делается попытка косвенного определения недостающих параметров. Если это не удастся, в таблице на этом месте ставится _

Сформировав все необходимые таблицы данных, приступим к вычислению мер значимости факторов.



АЛГОРИТМ 2. Определение степени

значимости факторов.

Для работы этого алгоритма необходимо:

чтобы был сформирован массив:

$T(N, M)$ - этот массив формируется с

использованием методов планирования

экспериментов,

где N - количество экспериментов;

M - количество параметров.

1. Ввод необходимых данных.

2. Разделение $T(N, M)$ на подклассы. По

результатам выхода и соответствия с

техническим регламентом выделены 2

подкласса.

3. Приведение массива к нормальному виду

с помощью формулы

$$T = \frac{T_{ij}}{\sum_{i=1}^N T_{ij}}$$

4. Открытие цикла по I

5. Вычисление количества участия казщого элемента в каж«ом классе.

Получается массив $L(K1, K2)$, где $K1=4$, $K2 = M/2$

6. Вычисление общего числа участия параметра во всех классах

$$E2 = \sum_{j=1}^4 \sum_{K=1}^{mj} LK_j$$

7. Вычисление количества участия элемента в своем классе

$$G_j = \sum_{j=1}^4 \sum_{K=1}^{mj} LK_j$$

8. Вычисление степени значимости i -го признака по формуле

$$Q_i = G_i/E_i$$

9. Рассмотрены ли все параметры ($I = M$)?

Если да, то переход к п. 10,

если нет, то переход к п. 12.

10. Увеличение индекса I на единицу.

11. Зачеркнем столбец I в таблице и переход к п. 5.

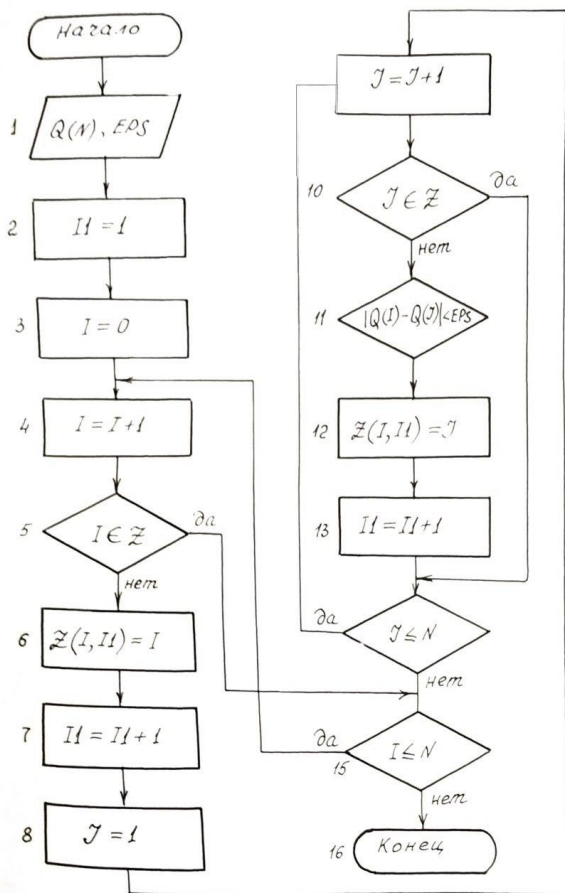
12. Конец.

- Статистическая обработка данных информационных массивов проводится по методике []

Произведем группировку факторов по их значимости. Проводятся следующие операции по обработке параметров процесса:

- определение степени значимости
- вычисление статистических параметров;
- отсев сильно корректирующих параметров;
- ранжирование параметров реакции по степени значимости.

Для большего удобства при включении в математическую модель необходимо произвести группировку факторов по степени их значимости.



АЛГОРИТМ 3. Группировка факторов.

1. Ввод необходимых данных.
2. Присваиваем $II = 3$
3. 4. Открытие цикла по I
5. Если - 2 параметр входит в множества, то переход к п. 15, если не входит, то переход к п. 6.
7. Увеличивается счетчик элементов в группе.
- 8, 9. Открытие цикла по
10. Если j входит в Z , то переход к п. 14, если не входит, то переход к п. 11
11. Проверка на близость мер важности

I и J элементов.

Если критерий удовлетворяется, то переход к п. 12, если нет, то переход к п. 14.

12. У заносится в Z
13. Увеличивается счетчик элементов в группе.
14. Конец по J
15. Конец цикла по I
16. Конец.

Результатом работы приведенных выше алгоритмов являются факторы, сгруппированные по степени значимости.

При построении математической модели факторы включаются группами в порядке выполнения условия адекватности.

Приложение 2

Средства обработки и формирования сигналов управления

Автоматизация управления промышленными предприятиями современными высокопроизводительными интенсивными процессами и агрегатами становится эффективной только при использовании вычислительной техники.

Структура ЭВМ в большой степени зависит от режима ее использования в системе управления. В настоящее время различают информационный, информационно-вычислительный ("советчик" оператора) и управляющий режим использования ЭВМ в АСУ ТП.

Для работы в СУ вычислительная машина должна быть укомплектована специальными устройствами связи с объектом (УСО), предназначенными для одно- или двухстороннего обмена информацией между объектом и машиной [1].

Обработка информации и формирование сигналов зависят от объема и уровня автоматизации промышленной установки, наличия ее процедурной модели и, следовательно, ее алгоритмического обеспечения.

Алгоритмическое обеспечение состоит из следующих алгоритмов:

- контроля;
- управления в нормальных и аварийных режимах;
- диагностики и прогнозирования;
- логической обработки информации.

Источниками информации для функционирования СУ служат приборы для измерения технологических характеристик процесса (температуры, давления расхода, рН, цвета, дебита, уровня, кислотности и др.), датчики аналогичных величин и дискретной информации характеризующие состояние агрегатов и механизма "положение переключателей", сигнализаторов и других.

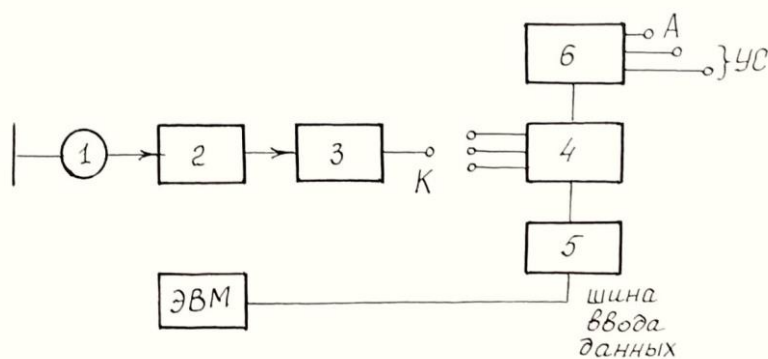
Исходный сигнал преобразуется в аналого-цифровом преобразователе в цифровой, состоящий из кодированных двоичных сигналов, собранных в цифровое слово.

Длина этого слова (в зависимости от точности аналого-цифрового преобразования) составляет 8-12 бит.

Из импульсного или ступенчатого входного сигнала в АЦП подучается кодированный цифровой сигнал.

АЦП выполняет модуляцию импульсного кода.

На рисунке представлен ввод аналоговых данных с локальными АЦП, где 1 - измерительный датчик; 2 - усилитель; 3- АЦП; 4 -переключатель точек измерения; 5 - запоминающее устройство; 6 -блок управления; А - адрес, УС - управляющие сигналы, К -кабель.



При подключении датчиков с устройством сопряжения и с объектом опрос датчиков производится по циклическим или адресным алгоритмам сбора информации в зависимости от характера решения задачи.

При циклическом опросе производится периодическое обращение к датчикам; сглаженные подученные текущие значения параметров и результаты их сравнения с нормальными и аварийными устанавливаются и дают нижние и верхние границы сравнения.

Для предотвращения ложного обнаружения выхода параметров управляемого процесса установки (предел между нижним и верхним значениями), обусловленные наличием случайных помех, спектр которых

значительно выше спектра полезного сигнала, производится сглаживание текущих значений параметров.

Сбор и первичная обработка информации включает фильтрацию, при которой выделяются помехи, в результате получается полезный сигнал.

Алгоритм фильтрации для биохимического производства можно представить в следующем виде:

$$X_t = W_t + P_t,$$

где X_t - случайный процесс; W_t - полезный сигнал; P_t - помехи.

Необходимо выделить из измеренных значений полезный сигнал, используя спектр экспоненциального сглаживания.

Входная переменная фильтрации имеет вид

$$\tilde{X}_t = \gamma \tilde{X}_{t-1} + (1 - \gamma)X_t = \widehat{W}_t$$

Когда помехи представляют собой низкочастотный тренд, оценку тренда можно записать как

$$\widehat{X}_t = \gamma \widehat{X}_{t-1} + (1 - \gamma)X_t = \widehat{P}_t$$

Вычитание суммарного сигнала значение помехи в качестве оценки полученного сигнала запишем

$$\widehat{W}_t = X_t - \widehat{P}_t$$

Передаточная функция фильтрации имеет вид

$$W_4(t) = \frac{1}{1 - B_t Z^{-1}},$$

где B_t – постоянная.

На втором этапе происходит проверка каждого параметра на достоверность, т.е. определение заданного значения, имеющего определенный смысл в области его изменения.

Наибольшее распространение получили два способа определения достоверности принятой от датчика информации: сравнение текущего значения с предельными возможными значениями этого параметра; второй -

контроль по скорости изменения - более универсален. Это объясняется тем, что большинство процессов в химико-технологических и биохимических производствах протекает достаточно медленно.

Для исключения влияния случайных выбросов, сообщение о неисправности датчика вырабатывается при многократном поддержании превышения допустимого значения скорости изменения измеряемой величины. При получении первоначального сигнала о превышении допустимой скорости дискретность контроля на достоверность увеличивается до дискретности, опроса датчика.

Таким образом, признак неисправности датчика будет выработан при выполнении условий:

$$\begin{aligned} |X(t_k) - X(t_k - \tau_c)| &> \Delta X_{max}, \\ |X(t_k + \tau) - X(t_k - \tau_c)| &> \Delta X_{max}, \\ |X(t_k + 2\tau_g) - X(t_k)| &> \Delta X_{max}, \end{aligned}$$

где τ_g - интервал времени контроля за производной;

τ_c - интервал времени опроса датчика;

t_k - время момента очередного контроля за производной, в котором был получен первый сигнал о превышении допустимой скорости.

Недостоверные значения измеряемой величины не допускаются на дальнейшую обработку, и в массивы выходных данных сохраняется последнее достоверное значение.

Для повышения достоверности определения значения величины и показателей можно принять во всех случаях (при условии независимости погрешности) различные оценки величины, существующие параллельно приборам и методам. За оценку искомой величины следует принимать взвешенную по погрешностям отдельных замеров сумму единичных оценок

$$X(t_i) = K \sum_{i=1}^n \frac{X_i(t_i)}{\sigma(t_i)}$$

где $X_i(t_i)$ - значение измеряемой величины в момент получения i -м прибором;

n - число используемых приборов для оценки искомой величины;

σ_{Xi} - средняя квадратичная погрешность замера величины

$X(t)$ - i -м приборам;

$K = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_{Xi}} \right)$ – весовой коэффициент, приводящий оценку

$X(t_i)$ и несмешанному виду.

При этом средняя квадратичная погрешность определения искомой величины снижается в соответствии с числом параллельных замеров и их погрешностями:

$$\sigma_x = 1 / \sum_{i=1}^m / \sigma_{Xi}$$

На третьем этапе выполняется усреднение значения параметров на заданном интервале времени.

Дискретное усреднение измеряемых величин за заданный интервал времени производится по формуле

$$Q_X(t_{n+1} - t_1) = \frac{1}{nt_0} \int_{t_x}^{t_{n+1}} X(t) dt.$$

На четвертом этапе выполняется операция линеаризации и масштабирования с учетом различной природы параметров реальных объектов.

Для получения истинного значения измеряемой величины производится обратное функциональное преобразование – линеаризация

$$X = f(X^*)$$

Одним из наиболее рациональных методов линеаризации является аппроксимация функции $f(X^*)$ при помощи полинома степени:

$$Z_n(X) = \alpha_n X^n + \alpha_{n-1} X^{n-1} + \dots + \alpha_1 X^1 + \alpha_0,$$

где X^* - измеряемая величина, которая подается на ЭВМ.

Наиболее удобным методом линеаризации зависимости является аппроксимация этой функции при помощи полинома (I).

После первичной обработки, т.е. фильтрации, усреднения, проверки на достоверность, линеаризации информация о текущем состоянии ТП поступает в пневматический регулятор. Одновременно к регулятору поступает оптимальное значение управляющих параметров, найденные в результате решения задачи оптимизации с использованием математических моделей, построенных по текущему состоянию в соответствии с выбранным критерием. По разности

$$X_{ont} - X_t = \Delta X$$

дорабатывается соответствующее управляющее воздействие 2.3 или задание на регулятор.

Сигнал рассогласования через АЦП и электро-пневматические преобразователи (в виде пневматических сигналов) поступает на регуляторы.

Использование в контуре системы управления пневматических регуляторов обосновано тем, что биохимическое производство относится к категории взрывоопасных объектов.

Пневматические регуляторы вырабатывает управляющие команды, которые зависят от разности между оптимальным и текущим состоянием и которые подаются на исполнительные механизмы. Последние обрабатывают управляющие воздействия (закрывая или открывая) реализующий орган на линии подачи или отвода технологической среда.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кабулов В.К. Алгоритмическое направление в кибернетике и пакеты прикладных программ. *Изд. АН УзССР, сер.техн. наук, 1976, №6. С. 3-9.*
2. Блохина И.Н., Угодчиков Г.А. Исследование динамики микробных популяций (системный подход). *Горький. Волго-Вятское кн. изд-во. 1960. - 168 с.*
3. Блохина И.Н., Огарков В.Н., Угодчиков Г.А. Управление процессами культивирования микроорганизмов (системный подход). *Горький. Волго-Вятское кн. изд-во 1983. - 174 с.*
4. Васильев М.Н., Амбросов В.А., Складнев А.А. Моделирование процессов микробиологического синтеза. *М. Лесн. пром-сть 1975 - 341 с.*
5. Иванов В.Н., Угодчиков Г.А. Клеточный цикл микроорганизмов и гетерогенность их популяций. *Киев: Наукова думка, 1984.*
6. Рахманов Ш. Р. "Система управления процессом приготовления субстратов". *"Состояние и развитие кибернетики в Узбекистане", Ташкент 1993. С.*
7. Кафаров В.В., Винаров А.Ю., Гордиев Л.С. Моделирование и системный анализ биохимических производств. *М.: Лесная пром-сть. 1985. - 280 с.*
8. Марчук Г.И. Математические модели иммунологии. *М. Наука. 1960. 239 с.*
9. Романовский О.М., Степанова Н.В., Чернявский Д.С. Математическая биофизика. *Ч. Наука. 1978. - 304 с.*
10. Зудин Д.В., Кантера В.Н., Угодчиков Г.А. Автоматизация биотехнологических исследований. *Москва, "Высшая школа", 1987.*
11. А.Ахметов, М.А. Исмаилов Математическое моделирование и управление технологическими процессами биохимического производства. *Ташкент, "Фан", 1968. - 96 с.*
12. Оицис Л.Я., Кристапсон М.Ж., Метиня Р.Р. Автоматическое регулирование величины рН. Управляемый микробный синтез. *Рига: Зинатне, 1973. С. 59-69.*
13. Решения Всесоюзной конференции по проблемам биоинженерии Инженерные проблемы микробиологического синтеза. *М., 1963,*

14. Ремез Е.О., Мамуня А.У. Система автоматического регулирования процессов рассиропного и дрожжегенераторного отделений спиртозавода. *Ферментная и спиртовая промышленность*, 1977, №1 – С. 9-11.
15. Смоляков Ю.М., Юрьев А.Г. Автоматическое регулирование температурного режима культивирования микроорганизмов поверхностным способом. *Ферментация и спиртовая промышленность*, 1977, №7, - С. 22-24.
16. Хвалов Ю.Г., Наливайко В.А. Яровенко В.А. Управление дрожжегенерацией по минимуму расхода энергоресурсов. *Ферментная и спиртовая промышленность.*, 1977, №6. - С. 35-38.
17. Хиль Г.И. Автоматические анализаторы процесса ферментации. *Хлебопекарная и кондитерская промышленность*, 1972, №7. – С.
18. Ахметов К.А., Исмаилов М.А., Рахманов Ш. Моделирование и управление процессом выращивания микроводорослей. *Вопросы кибернетики. Ташкент*, 1992, № 146 - С. 95-103.
19. Лежнев Э.И., Панкратов В.П., Кошевой Ю.В. Управляемое культивирование клеток. *М.: Наука*, 1974. - С. 9-19, 75-82.
20. Бекмуратов Т.Ф., Камиллов М.М., Рахимов Т.Н. Идентификация химико-технологических объектов. *Ташкент: Фан*. 1970. - С.183.
21. Бирюков В.Б., Кантере В.М. Оптимизация периодических процессов микробиологического синтеза: *М.: Наука*. 1985. - 296с.
22. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. *М.: Наука*. 1965. - С. 340.
23. Нахманович Б.М. Исследование кинетики сбраживания различных сахаров бактериями. *Труды ВНИИ продуктов брожения. Вып. 19. М: 1970*.
24. Кантере В.М. Системный подход к анализу и синтезу промышленной системы культивирования микроорганизмов. *Применение математических методов в микробиологии. Пущино*, 1975. -С. 97-119.
25. Кантере В.М. и др. К теории управления процессами культивирования микроорганизмов. *Микробиологическая промышленность, Вып. 6. 1970. - С. 1-66*.
26. Проблемы кибернетики - *Под ред. Ляпунова А.А. Вып. 25.М. Наука. 1972. - С. 5-39*.
27. Складнев А.А., Васильев Н.Н. Амбросов В.А. Основные направления в моделировании кинетики роста популяции микроорганизмов. 1972, №17, *Вып. 5. - С. 494*.

28. Рахманов Ш. К моделированию класса объектов многостадийных процессов. *IX республиканская школа молодых ученых и специалистов по АСУ и автоматизации проектирования. Тезисы докладов, ч. II. Ташкент, 1984.*
29. Рахманов Ш. К разработке алгоритмов построения математических моделей квазистационарных процессов. *Актуальные проблемы общественных и естественных и технических наук. "Фан", Ташкент, 1986.*
30. Рахманов Ш. К вопросу решения некорректных задач методом регуляризации. *Программное, алгоритмическое и техническое обеспечение АСУ ТП ч. II., Тезисы докладов, Ташкент, 1965.*
31. Исмаилов М.А., Рахманов Ш., Буриев С.Б., Ахунов А.А. Моделирование процесса культивирования зеленых микроводорослей: *сб. тезисов Республиканской научно-технической конференции. Основные направления и опыт использования солнечной энергии в народном хозяйстве, Карши, - 1988, 14-15 с.*
32. Ахметов К.А., Рахманов Ш. Алгоритм сбора и первичной обработки информации при микропроцессорном управлении ""*Республиканская научно-техническая конференция. Тезисы докладов, Ташкент, 1988.*
33. Рахманов Ш. Муминджанов А.А., Хайтматов У.Т., Маджидов Р.Р. Выбор основных факторов, влияющих на процесс культивирования микроводорослей. *Актуальные вопросы информатики, автоматизации и вычислительной техники, Ташкент, - 1989.*
34. Исмаилов М.А., Рахманов Ш. Алгоритмизация моделирования и управления многорежимными комплексами биохимического производства. Проблемы создания, опыт разработки внедрения АСУ в нефтяной, газовой и нефтехимической промышленности и объектов нефтеснабжения, *Тезисы докладов, Сумгаит, 1990, - 63 с.*
35. Рахманов Ш. Алгоритмизация класса объектов биохимических производств. Проблемы создания, опыт разработки, внедрения АСУ с нефтяной, газовой и нефтехимической промышленности и объектов нефтеснабжения, *Тезисы докладов, Сумгаит.*
36. Ахметов К.А., Рахманов Ш. Вопросы моделирования процесса выращивания микроводорослей. *Труды ТМИ, Ташкент, - 1991. 37.*
37. Ахметов К.А., Исмаилов М.А., Таиров О.С., Рахманов Ш. Математическая модель процесса выращивания микроводорослей. Сборник тезисов докладов. *Современные проблемы автоматизации, АН УзССР, Ташкент, - 1991.*

38. Рахманов Ш.Р. Функциональная алгоритмическая структура системы управления процессом культивирования хлореллы. *Сб. Вопросы кибернетики, №149, Ташкент, 1993. – С. 117-121.*
39. Кабулов В.К. Проблемы алгоритмизации в механике сплошных сред. *В сб. Прикл. проблемы прочности и пластичности. Горький, 1995.*
40. Гительзон Н.И., Ковров Б.Г., Терсков Н.А. О математическом описании процесса непрерывного культивирования микроводорослей, *ДАН СССР, 1965, V 3, — С. 692—695.*
41. Иерусалимский Н.Д. Принципы регулирования скорости роста микроорганизмов // *Управляемый биосинтез, М., 1966. - С. 5-18 :*
42. Иерусалимский Н.Д., Неронов Н.М. Количественная зависимость между концентрацией продуктов обмена и скоростью роста микроорганизмов, *ДАН СССР, 1961, Т.161, №6.*
43. Гуревич Ю.Л., Ковров Б.Г. О новом принципе регулирования скорости роста микроорганизмов при непрерывном культивировании, *ДАН СССР, Т.174, Вып.1, 1967. - С. 213.*
44. Степанова Н.В., Романовский Ю.М., Иерусалимский Н.Д., Об одной модели роста микроорганизмов при проточном культивировании. *Управляемый биосинтез, М., 1966. - С. 24-28.*
45. Ахметов К.А., Рахманов Ш. Информатизация бухгалтерского учета, Информатизация Республики и новые информационные технологии, *Ташкент, - 1994.*
46. Рахманов Ш., Ахметов К.А. Система информационного обеспечения управления процессом культивирования хлореллы. *Информация Республики и новые информационные технологии, Ташкент, - 1994.*
47. Владимирова М.Г., Семененко В.Е. Интенсивная культура одноклеточных водорослей, *Изд-во АН СССР, Москва, 1962 - С.60.*
48. Исмаилов М.А., Рахманов Ш.Р. Роль корректирующего фактора при управлении процессом выращивания микроводорослей, *Тезисы докладов региональной научно-технической конференции Моделирование и управление в технических системах. Ташкент, 1991, ч. - С. 79.*
49. Исмаилов М.А., Рахманов Ш.Р. Диалоговая система принятия решения в сложных технологических объектах, *Тезисы докладов всесоюзного совещания Проблемы компьютерного интегрирования производства, Киев, 1990 – С.35.*
50. Monod J. La Technique de Culte Continue. Theore et Applications. *Ann. Inst. Pasteur, 1950. v.79. p.390.*

51. Novisk A., Szillard L. Description of the chemostat. *Jcince*, 1950. v.112. p.715.
52. Кирьяненко В.С. и др. Проблемы автоматизации микробиологического эксперимента. Управляемый микробный синтез, *Рига: Зинатне*, 1973 – С. 5-24.
53. Музаффаров А.М., Таубаев Т.Т. Хлорелла, «Фан», *Ташкент*, 1974 – С. 130.
54. Музаффаров А.М, Культивирование водорослей и высших водных растений в Узбекистане, *Фан, Ташкент*, 1972. – С. 146.
55. Упитис В.В. Макро- и микроэлементы в оптимизации минерального питания микроводорослей. *Рига, Изд-во Зинаьге*, - С.296.
56. Перт С.Дж. Основы культивирования микроорганизмов и клеток. *Перевод с англ. (Под ред. Н.Л. Роботновой), М: Мир*, 1978. – 332с
57. Рекомендации по внедрению промышленных фотореакторов по производству хлореллы с использованием солнечной энергии в сельском хозяйстве. *Ашхабад*, 1972, - С.48.
58. Зудин Д.В., Кантера В.Н., Угодчиков Г.А. Автоматизация биотехнологических исследований. *Москва, "Высшая школа"*, 1987. – С.110.
59. Романовский О.М., Степанова Н.В., Чернявский Д.С. Математическая биофизика. *Ч. Наука*. 1978. - 160 с.
60. Бондарь А.Г. Математическое моделирование химико-технологических процессов. *Киев, Высша школа*, 1973. – 279 с.
61. Рубин А.Б., Литыва Н.Ф., Резниченко Г.Ю. Кинетика биологических процессов. *М., Изд. МГУ*, 1987, - 211 с.
62. Droop M.R. 25 years of algal growth kinetics. *A personal view*.
63. Ворфоломеев С.Д., Калюжный С.В. Биотехнология: Кинетические основы микробиологических процессов, *Учебное пособие для биол.хим.спец. вузов. М.: Высшая школа*, 1990. – 196с.
64. Корниш-Вуден Э. Основы ферментативной кинетики. *М.: Мир*, 1979, - 278 с.
65. Рубин А.Б., Литыва Н.Ф., Резниченко Г.Ю. Кинетика биологических процессов. *М., Изд. МГУ*, 1987, - 328 с.
66. Amodoc of the cell cycle and dell division phasing in marine diatom. Heath M.R. Spencer C.P “*J. Gen Microbiol*”. 1985. 131. №3. 411-425.

67. Полтораки О.М., Чухрай Е.С. Физико-химические основы ферментативного катализа. М. Высшая школа, 1971, -312 с.
68. Биотехнология. Принципы и применение. Перевод с англ. Под ред. Н.Хиччикса, Д. Беста, Дж. Джонса М.: Мир, 1988, 180с.
69. Юсупбеков Н.Р., Бабаянц, Мунчикв Н.А., Якубов Э.М. Управление процессами ферментации с применением микро - ЭВМ. Ташкент, 1987. – 200 с.
70. Кабулов В.К. Алгоритмизация в механике сплошных сред. Ташкент, Изд-во Фан, 1979. – 304 с.
71. Еорниш – Боуден Э. Основы ферментативной кинетики. М.: Мир, 1979. – 278 с.
72. Иерусалимский Н.Д. Теоретические и промышленные аспекты микробиологического синтеза, *Вестник АН СССР* 1965. – С. 42-50.
73. Николаев П.И., Кантере В.М. Автоматизация процессов микробиологического синтеза. *Журнал Всесоюзн. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева.* 1972. 17 вып. – С. 569-576.
74. Островский Г.М., Волин Ю.М. Моделирование сложных химико – технологических систем М.: Химия. 1975. – С. 311.
75. Лосдон А.С. Оптимизация больших систем. М: Физматгиз. 1975. – 431 с.
76. Реклайтис Г., Рейвиндран Л., Речедел К. Оптимизация в технике. Пер с англ. М., Мир, 1986. – 320 с.
77. Основы управления технологическими процессами. Под ред. Н.С. Рейбмана. М.: Наука, 1978. – 448 с.
78. Кафаров В.В., Винаров А.Ю., Гордиев Л.С. Моделирование биохимических реакторов М.: Химия, 1983.
79. Кафаров В.В. Основы массопередачи, М: Высшая школа, 1972. – 426 с.
80. Chlamydomonas geitleri Ette semicon – continuons culion of chlamydomonas geitleri Ette in wastewater. “Acta agron Acad sei hung”. 1982. 31. № 3 – 4. 270-278.
81. Minami K. Industrialization of edible chlorella in Japan. *Reports from the Japan Micro algae research Institute, Tokyo, 1959.*
82. De Roos A.M. Flikb J.G. “J. Plankton Res” 1985. 7, №5. 665-677 (англ.). Modeling time – series of photosynthesis and comparisons with the fluorescence yileld in cft o rebba vulderi.

83. Таубаев Т.Т., Буриев С., Садыкова А.М. Влияние концентрированного солнечного света (ИКСС) на сорбционную активность микроводорослей в культуре. «Регуляция микробов метаболизма факторами внешней среды» *Международный симпозиум ФЕМО, Пушкино 1 – 7 июня 1983.* – С. 100.
84. Seiss vlrich Bohm Veinr niekll nans 6 unther Bornd (Eilke) Eike. Влияние на свет различной интенсивности и качества на рост и скорость развития chlorella vulgaris Der Einflub tat auf das wachstum and die Entwickeungeges chninoligkeit von chlorella Vulgaris “*Arch Hudro biol*”. 1982. *Suppl 63 №2.* 205-210 (нем.рез.анг.)
85. Егоров В.Н., Зесенко А.Я., Пархоменко А.В., Дененко З.З. Математическое описание кинетики обмена минерального фосфора одноклеточными водорослями. *Гидробиолог. журнал, 1982, 18, №4, 45-50 (ред.анг)*
86. Транспорт CO₂ в культуре X автотрофных водорослей (анг.). CO₂ transport incultures of tutotrophic jlгac (анг.). автор: Divshsky karel “*Arch Hydrobiol*”. 1982. *Supplemutd. 63. №1.* 101-109 (анг.).
87. Heintz M.F. and Heitman H. Nutritive value of algae for swine. “*California agriculture*”, vol.19, 1965, №2.
88. Spalding M.H., Portus A.R. “*Pljtd*”. 1985. 164. №3, 308-320 (анг.).
89. Потенциальная продуктивность водорослей. Potential algae production ab: Grobbelaar Johoh u “*Water S.A*”. 1982, 8, №2. 19-85 (анг.)
90. Krauss R.W. Mass culture of algae for food and other organic compounds. *American Journal “Botany”*, v.49, 1962 №4.
91. Krauss R.W. and Specht A.W. Nutritional requirements and fields of algae in mass culture. *Photochemical process. Tucson. Ariz. Utiv. Arizona Press, v.4, 1958.*
92. Рост и развитие двух штаммов хлорококковой водоросли chlorella vulgarus beiј при культивировании (с изменением) света и температуры Wachstum and Entwiokung vonzweistsmmen der chlorococcolen alge chl. vul. Beiјin in Abhangigkeit Von den Kultionsliden gungen eicht and temperatur. “*Azch Hudrobid Suppl*”.
93. Влияние моделированного течения воды на скорость роста и азотный обмен у Grocilorіa tikvahial (Rhodophyta). Essects of Simutatus cesrent on the aroroth Rate and Nitrogen Metabolism of Geacigariatin ab: Parker H.S “*Mar, Bid*”, 1982, 69, №12, 137-145 (анг.).
94. Вапилова Л.В., Беянин В.Н., Сидько Р.Я. Параметрическая модель биосинтеза низших фотоавтотрофов в прерывистом синтезе разменного спектрального состава *Изв. СОАН ССВ, Препр. 1985, №39 Б.* – 25 с.

95. Рост и питание зеленой водоросли *Scenedesmus dimorphus* в широкой области соотношения азот – фосфор II кинет. Модель Growth and nutrient uptake of green alga *Scenedesmus dimorphus*, Under (uptake) a wide range of nitrogen (phosphorus ratio II Kinetics model. Kunikanes “*Water Res*”, 1984, 18, №10, 1313-1326 (анг).
96. Van Vuren Marelle M.J Grobbeiaar Johan “Waer” Отбор видов водорослей для массового открытого культивирования Selection of algal species for use in open outdoor mass cultures.
97. Букатин В.Е., Зирева М.Г., Симеников В.Д. Биотехнология непрерывного культивирования хлореллы с направленным изменением биохимическим активом. *Всесоюзное совещание по вопросам круговорота веществ в замкнутых системах на основе жизнедеятельности организмов, Киев, сент. 1981, 1983. – 25-29 с.*
98. Тренкеншу Р.П., Вапилова А.В. Модель светозависимого хлорофилла в микроводорослях. *Известия СО АН СССР, серия биологических наук, 1984. №13, 3-7 с. (рез. англ.)*.
99. Музаффаров А.М., Таубаев Т.Т. Производство биомассы хлореллы и других микроводорослей. Культивирование и применение водорослей в народном хозяйстве. *Материалы республиканской конференции, Ташкент 27-29 августа 1984.*
100. Шубернецкий И.В., Борш З.Г. Культивирование хлореллы в различных темных и световых условиях. *Биологические основы культивирования водных организмов, Кишинев, 1983. – 26-35 с.*
101. Sorokin C., Mayers J. A high – temperature strain of chlorella. *Science, vol.117, №3039, 1953.*
102. Владимирова М.Г., Кузнецова В.Д. Динамика изменения содержания азота и фосфора в среде в различных условиях интенсивного выращивания хлореллы. *Физиология растений, 1964, Т.2, вып. 5. – С. 827-831.*
103. Терещенко Н.Н., Егоров В.Н. Кинетические закономерности поглощения и выведения фосфора черноморской зеленой водорослью. *Докл. УзССР. 1985. 6. № 79-82 (рез.англ.)*.
104. Кофанов В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. М., *Химия. 1985. – 440 с.*
105. Sorokin C. Tabular comparative data for the low and high – temperature strains of chlorella. *Nature (Engl.), vol.184, №4586, 1959, p. 613-614.*

106. Ахметов К.К., Исмаилов М.А., Юлдашев А.В. Система автоматического управления процессом выращивания микроорганизмов. *А.с. №1306955. Оубл. В Б.И. 1987.*
107. Исмаилов М.А., Юлдашев А.В., Муминджанов А.А. Способ подготовки питательной среды для непрерывного культивирования микроорганизмов. *Полож. решение на выдачу А.с. №4639873/31-13 (012331) от 19.01.89.*
108. Рахманов Ш. Алгоритм прогнозирования и управления процессом культивирования хлореллы. *Труды ТашГАУ, Ташкент – 1995. С. 49-51.*
109. Рахманов Ш. Применение моделей и алгоритмов для повышения эффективности системы контроля и управления процессом культивирования хлореллы. *Труды ТашГАУ. Ташкент – 1995. С. 85-87.*
110. Рахманов Ш Математическое моделирование и управление технологическими процессами микробиологического производства. - Математика – 2011 ЎзРнинг мустақиллигининг 20 йиллигига бағишланган халқаро илмий-амалий конференция материаллари – 2011. – 2 бет.
111. Рахманов Ш Қишлоқ хўжалик маҳсулотлари ишлаб чиқариш жараёнларининг GLOBALGAP – стандарти. - ТошДАУ, “Ўзбекистон республикаси агросаноат мажмуаси тармоқларида инновацион бошқарув фаолиятини модернизациялаш ва ривожлантириш муаммолари” номли илмий-амалий конференцияси материаллари, 1-қисм 2013 йил. – 2 бет.
112. Рахманов Ш Оптимизация улучшения качества работы датчика уровня воды ЗРСУ-3 в дренажной системе. - Ўзбекистон қишлоқ хўжалиги №11.2018. – 2 бет.
113. Рахманов Ш Информационные системы и базы данных в гидрографическом управлении водными ресурсами. - Ўзбекистон қишлоқ хўжалиги №11.2018. - Международная научно-практическая конференция на тему: “Проблемы повышения эффективности работы современного производства и энерго-ресурсосбережения” 3-4 октября 2018 года, Андижан. – 3 бет
114. Рахманов Ш Методы оценки и проблемы управления конкурентоспособности промышленных предприятий. - Журнал “Агро Илм”, 2019 год, №2 (58). – 2 бет.
115. Рахманов Ш Применение моделей и алгоритмов для повышения эффективности системы контроля и управления процессом культивирования хлореллы. - 22 апрель - «Халқаро Ер куни» муносабати билан “Ер ресурсларини бошқариш ва муҳофаза қилишда инновацион ёндошувлар:

муаммо ва креатив ечимлар” мавзусида республика илмий-амалий анжумани, Тошкент, 2019 йил 22-23 апрель. – 3 бет.

116.Рахманов Ш Методы решения задачи оптимального управления культивированных микроводорослей. - Ўзбекистон қишлоқ хўжалиги махсус сон – 2019 йил. – 5 бет.

117. Рахманов Ш Особенности производства микроводорослей как объектов математического моделирования и автоматического управления. - “Агросаноат мажмуаси учун фан, таълим ва инновация: муаммолар ва истиқболлар” мавзусида халқаро илмий – амалий анжумани. Тошкент 2019. – 5 бет.

118. Рахманов Ш Разработка алгоритмов прогнозирования протекания технологического процесса культивирования микроводорослей. - “Агросаноат мажмуаси учун фан, таълим ва инновация: муаммолар ва истиқболлар” мавзусида халқаро илмий – амалий анжумани. Тошкент 2019. – 5 бет