

УДК: 519.711.3:57.083.13

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ НЕПРЕРЫВНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ

Ш.Р.Рахманов - к.т.н. доцент

Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства

Аннотация

В статье проанализированы возможные критерии оптимальности в виде технико-экономических показателей процесса культивирования микроорганизмов, экстремум которых наилучшим образом отвечает задачам производства и отражает основные стороны функционирования объекта управления. Выполнен анализ возможных режимов культивирования микроводорослей. Обоснованы два алгоритма оптимизации. Первый основан на методе случайного поиска с абсолютным смещением алгоритма оптимизации процесса культивирования микроорганизмов при непрерывной регенерации потока в одном культиваторе. Второй, представляет собой алгоритм определения оптимального времени пребывания частиц хлореллы в многостадийных культиваторах, ориентированный на метод динамического программирования, реализованный при рекуррентном соотношении Веллмана. Разработанный алгоритм оперативного прогнозирования и автоматического управления процессом культивирования хлореллы позволяет при заданных производственных условиях и составе питательных веществ повысить производительность технологического оборудования и улучшить качество целевого продукта, а также заблаговременно предотвратить различные нежелательные, непредвиденные и аварийные производственные ситуации.

Ключевые слова: автоматизация, хлорелла, микроводоросли, математическая модель, критерий оптимальности, алгоритм.

МИКРООРГАНИЗМЛАРНИ ЎСТИРИШНИНГ УЗЛУКСИЗ ТЕХНОЛОГИК ЖАРАЁНЛАРИНИ ОПТИМАЛЛАШТИРИШ АЛГОРИТМИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ

Ш.Р. Рахманов - т.ф.н., доцент

Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини механизациялаш муҳандислари институти

Аннотация

Мақолада мумкин бўлган барча мақбуллик мезонлари микроорганизмларни етиштириш жараёнининг техник-иқтисодий кўрсаткичлари шаклида таҳлил қилинган, аниқланган экстремуми ишлаб чиқариш вазифаларига айнан мос келади ва бошқариш объекти фаолиятининг асосий жиҳатларини акс эттиради. Микросув ўтларини етиштиришнинг мумкин бўлган усулларини таҳлил қилиш амалга оширилди. Иккита оптималлаштириш алгоритми асосланган. Биринчиси, мутлақ силжиш билан тасодифий қидириш усулига, битта культиваторда оқимнинг узлуксиз янгиланиши билан микроорганизмларни етиштириш жараёнини оптималлаштириш алгоритмига асосланган. Иккинчиси - хлорелла зарраларининг кўп босқичли культиваторларда оптимал яшаш вақтини аниқлаш алгоритми, Веллманнинг такрорланиш муносабати билан амалга ошириладиган динамик дастурлаш услубига йўналтирилган. Хлорелла етиштириш жараёнини тезкор прогнозлаш ва автоматик бошқариш алгоритми ишлаб чиқариш шароитида ва озуқа моддаларининг таркибида технологик ускуналарнинг унумдорлигини оширишга ва мақсадли маҳсулот сифатини яхшилашга имкон беради, шунингдек, олдиндан турли хил ҳолатларнинг, қутилимаган ва фавқулудда ишлаб чиқариш вазиятларининг олдини олишга имкон беради.

Таянч сўзлар: автоматлаштириш, хлорелла, микроалгеялар, математик модели, мақбуллик мезонлари, алгоритм.

DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR OPTIMIZATION OF CONTINUOUS TECHNOLOGICAL PROCESS OF CULTIVATION OF MICROORGANISMS

Sh.R. Rakhmanov - c.t.s., associate professor

Tashkent Institute of Irrigation and Agricultural Mechanization Engineers

Abstract

In article the analysis of possible modes of microalgae cultivation has been carried out. Two optimization algorithms are substantiated. The first one is based on the method of random search with an absolute bias, an algorithm for optimizing the process of cultivating microorganisms with continuous regeneration of the flow in one cultivator. The second is an algorithm for determining the optimal residence time of chlorella particles in multistage cultivators, focused on the method of dynamic programming, implemented in Wellman's recurrence relation. The developed algorithm for operational forecasting and automatic control of the chlorella cultivation process allows, under given production conditions and the composition of nutrients, to increase the productivity of technological equipment and improve the quality of the target product, as well as to prevent in advance various unforeseen and emergency production situations.

Key words: automation, chlorella, preparation process, mathematic model, cultivation, algorithm.

Введение. 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. Микробиологические процессы характеризуются режимом работы, при котором сложная биохимическая реакция и явления массообмена сопровождаются интенсивным потреблением различных питательных веществ и однородным 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 [1, 2, 3, 4].

Попытка оптимизировать процесс по соответствующим критериям, 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 венил 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 (1) [5, 6, 7].

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

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 и качества выпускаемого целевого продукта изменяются в широких пределах. Поэтому необходимо решить сложную оптимизационную задачу, которая учитывала бы заданные значения входных и управляющих параметров [8, 9, 10].

Методы решения. Задача решается на основе математической модели с привлечением эффективных вычислительных методов и современных средств вы-

числительной техники. Объект управления описывается уравнением типа:

$$\frac{dx}{dt} = f_s(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_n, t). \quad (2)$$

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)

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

где: 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 (1), 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:

$$F_i(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_n, t) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (3)$$

Ограничения F_i могут быть функционалами.

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:

$$I = \int_0^T Y(u, x) dt \quad (4)$$

Пусть в n -мерном пространстве движущаяся с постоянной скоростью точка равна следующей зависимости:

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

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

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.:

$$\Delta f = \left\{ \frac{df}{dx_1} / x = \bar{x}_1, \dots, \frac{df}{dx_n} / x = \bar{x}_n \right\} \quad (5)$$

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 X определяется формулой:

$$\frac{df}{dt} / t = 0 = \sum_{s=1}^n \frac{df(\bar{X})}{dx_s} l_s \quad (6)$$

Правая часть этого соотношения имеет наибольшее значение при:

$$l = \frac{\frac{df(\bar{X})}{dx_s}}{\sqrt{\sum_{s=1}^n \left(\frac{df(\bar{X})}{dx_s}\right)^2}} \quad (7)$$

Формула (7) дает выражение для компонента единичного вектора, направленного по градиенту функции $f(x)$. Функция $f(x)$ при движении из точки \bar{X} имеет наибольшую скорость убываний обратно направлению вектора (7).

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 [11,12].

Рассмотрим использованный алгоритм случайного поиска с абсолютным смещением [13,14].

Метод случайного поиска с абсолютным смещением применяется для многократного выполнения случайного шага до тех пор, пока это не приведет к успеху. Если $\Delta x^{(j)}$ - успешный шаг, то выбирается $\Delta x^{(j+1)} = -\Delta x^{(j)}$ и проверяется, успешен ли такой выбор? Если же $\Delta x^{(j)}$ привел к неудаче, то выбирается: $\Delta x^{(j+1)} = \Delta x^{(j)}$

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. 1.

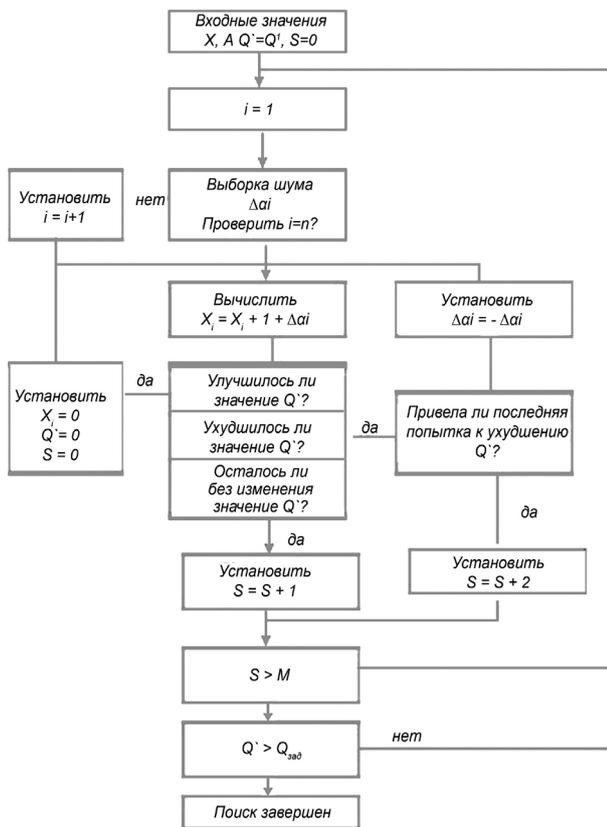


Рис.1. Блок-схема алгоритма случайного поиска

Задача оптимизации технологического процесса выращивания микроводорослей решалась на ЭВМ.

Анализ результатов и примеры. Задача оптимизации процесса культивирования хлореллы при непрерывной регенерации потока в одном культиваторе решена выше.

Однако зачастую процесс культивирования реализуется в нескольких последовательно соединенных каскадах культиваторов, где поток непрерывно протекает из одного культиватора в другой в многостадийном переключаемом режиме. Для оптимизации таких многостадийных про-

цессов важно определить оптимальное время культивирования в отдельных культиваторах с тем, чтобы получить на выходе максимальную концентрацию хлореллы [15,16]

Для рассматриваемой задачи выбран критерий оптимальности вида:

$$R_1 = \sum_{i=1}^N x_i \quad (8)$$

где:

$$x_i = \frac{D_i - \mu_i}{D_i x_{i-1}}$$

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

X_i - концентрация микроорганизмов в i -ом культиваторе

Для случая $I = 1$ имеем:

$$X_1 = \frac{D_1 - \mu_1}{D_1 X_0} \quad (9)$$

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

Пусть на управляющие переменные процесса D_i наложены ограничения:

$$D^{(n)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i}} \quad (10)$$

При переходе от стадии к стадии на первом этапе решения задачи методом динамического программирования размерность ее увеличивается на единицу за счет ограничения типа равенства (10) в области изменения $D^*(8, 9)$.

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 исходный критерий видоизменяется:

$$R_i^* = x^{(n)} + \frac{\lambda}{\sum_{i=1}^n 1/D} = R_1 + \frac{\lambda}{\sum_{i=1}^n 1/D_i} \quad (11)$$

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:

$$f(x^{(N-1)}, \lambda) = D_n \max \left\{ \lambda D_n + \frac{D_i - \mu_i}{D_i x_{N-1}} \right\} \quad (12)$$

Изменение концентрации x_i в процессе непрерывного культивирования хлореллы описывается уравнением:

$$\frac{dx_i}{dt} = D_i(x_{i-1} - x_i) + \mu_i * x_i \quad (13)$$

Чтобы получить значения концентрации хлореллы (9) для случая стационарного режима, достаточно в этом уравнении (13) производные по времени положить равными нулю:

$$D_i(x_{i-1} - x_i) + \mu_i * x_i = 0 \quad (14)$$

Значение x_i из уравнения (14) и оптимальное значение D_n для последнего культиватора определяется из следующего условия:

$$\frac{\delta}{\delta D_n} \left\{ \lambda D_n + \frac{D_n - \mu_n}{D_n * x_{N-1}} \right\} \quad (15)$$

позволяющего получить уравнение:

$$\lambda + \frac{\mu_n}{D_n^2 * x_{N-1}} = 0$$

его решение такое:

$$D_n = \frac{\sqrt{\mu_n}}{\lambda * x_{N-1}} \quad (16)$$

Пользуясь соотношением (14), полученные значения подставляем в уравнение (12) и имеем:

$$f_1(x^{N-2}, \lambda) = D_{N-1} \max \quad (17)$$

$$\left\{ \lambda D_{N-1} + \lambda \sqrt{\frac{\alpha_N X_N}{\lambda X_{N-1}}} + x^{(N-1)} + \frac{\sqrt{\alpha_{N-1} X_{N-1} - \mu_N}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-1} X_{N-1}}{\lambda X_N X_{N-1}}}} \right\}$$

На основе уравнения (9) записываем рекуррентное соотношение Беллмана для (N-1) культиватора:

$$f_2(x^{(N-2)}, \lambda) = D_{N-1} \max \quad (18)$$

$$\left\{ \lambda D_{N-1} + \lambda \sqrt{\frac{\alpha_N}{\lambda X_{N-1}}} + x^{(N-1)} + \frac{\sqrt{\alpha_{N-1} X_{N-1} - \mu_N}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-1}}{\lambda X_N X_{N-1}}}} \right\}$$

При этом: $x^{(N-1)} = x^{(N-2)} + \frac{D_{N-1} - \alpha_{N-1}}{D_{N-1} X_{N-2}}$ (19)

Подставляя значение $x^{(N-1)}$ в уравнение (18), получим:

$$f_2(x^{(N-2)}, \lambda) = D_{N-1} \max \quad (20)$$

$$\left\{ \lambda D_{N-1} + \lambda \sqrt{\frac{\alpha_{N-1}}{\lambda X_{N-1}}} + x^{(N-2)} + \frac{D_{N-1} - \alpha_{N-1}}{D_{N-1} X_{N-2}} + \frac{\alpha_N X_N X_{N-1}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-1} X_{N-1}}{\lambda}}} \right\}$$

Аналогично находим D_{N-1} и $f_2(x^{(N-2)}, \lambda)$ из условия (15):

$$D_{N-1} = \sqrt{\frac{\alpha_{N-1} X_{N-1}}{\lambda}} \quad (21)$$

$$f_2(x^{(N-2)}, \lambda) = \lambda \sqrt{\frac{\alpha_N X_N}{\lambda}} + x^{(N-2)} + \frac{\alpha_N X_N X_{N-1}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-1} X_{N-1}}{\lambda}}} + \frac{\alpha_N X_N}{\sqrt{\frac{\alpha_N X_N}{\lambda}}} \quad (22)$$

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

$$D_{N-2} = \sqrt{\frac{\alpha_{N-2} X_{N-2}}{\lambda}} \quad (23)$$

$$f_3(x^{(N-3)}, \lambda) = \lambda \sqrt{\frac{\alpha_{N-2} X_{N-2}}{\lambda}} + \lambda \sqrt{\frac{\alpha_{N-2} X_{N-2}}{\lambda}} + \lambda \sqrt{\frac{\alpha_N X_N}{\lambda}} + x^{(N-3)} + \frac{\alpha_N X_N X_{N-2}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-2} X_{N-2}}{\lambda}}} + \frac{\alpha_N X_N X_{N-1}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-1} X_{N-1}}{\lambda}}} + \frac{\alpha_N X_N}{\sqrt{\frac{\alpha_N X_N}{\lambda}}} \quad (24)$$

Из уравнений (16), (23), а также с учетом выражений (17), (22), и (24) для произвольного i-ого реактора выводятся следующие формулы:

$$D_i = \sqrt{\frac{\alpha_i X_i}{\lambda}} \quad (25)$$

$$f_{N-i+1}(x^{(i-1)}, \lambda) = \lambda \sum_{j=0}^{N-i} \sqrt{\frac{\alpha_{N-j} X_{N-j}}{\lambda}} + x^{(i-1)} + \sum_{j=0}^{N-j} \frac{\alpha_{N-j} X_{N-j}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-j} X_{N-j}}{\lambda}}} \quad (26)$$

Пользуясь уравнениями (25) и (26) для первого реактора каскада при $i=1$ получаем:

$$D_i = \sqrt{\frac{\alpha_i X_i}{\lambda}} \quad (27)$$

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

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 (27) в уравнение (9) 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 (25) рассчитывается оптимальное значение для случая $i=2$

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

Подставляя найденные как функции величины D_i из выражения (25) в условие (10), определяем значения λ . В этом случае уравнение принимает вид

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

Из этого выражения следует, что для N последовательных соединенных культиваторов общее время пребывания $T=1/\lambda^N$ 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 (11), если иметь ввиду, что максимальное значение R^* отражается соотношением (28).

$$f_N(x^{(0)}, \lambda) = \lambda \sum_{j=0}^{N-i} \sqrt{\frac{\alpha_{N-j} X_{N-j}}{\lambda}} + x^{(0)} + \sum_{j=0}^{N-j} \frac{\alpha_{N-j} X_{N-j}}{\sqrt{\frac{\alpha_{N-j} X_{N-j}}{\lambda}}} \quad (28)$$

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

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

Найденные значения λ подставляем в уравнение (25) и получается скорость разбавления для произвольного i-ого культиватора в виде:

$$D_i = D^{(N)} \sqrt{\alpha_i * x_i} \left(\sum_{j=0}^N \sqrt{\frac{x_j}{\mu_j}} \right) \quad (29)$$

При $\mu_i=const$ и $x_i=const$ уравнение (29) принимает следующий вид:

$$D_i = D^{(N)} * N \quad (30)$$

или

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

Выводы. 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. 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.

№	Литература	References
1	Кирьяненко В.С. Проблемы автоматизации микробиологического эксперимента. Управляемый микробный синтез, – Рига: Зинатне, 1973. – С. 5-24.	Kirichenko V. S. <i>Problemi avtomatizatsii mikrobiologicheskogo eksperimenta. Upravlyаемый mikrobniiy sintez</i> [Problems of automation of microbiological experiment. Controlled microbial synthesis], Riga: zinatne, 1973, Pp. 5-24.(in Russian)
2	Музаффаров А.М., Таубаев Т.Т. Хлорелла. – Ташкент: «Фанат», 1974. – 130 с.	Muzaffarov a.m., Taubaev T. T. <i>Xlorella</i> [Chlorella], "Fanat", Tashkent, 1974, 130 p. (in Russian)

3	Музаффаров А.М. Выращивание водорослей и высших водных растений в Узбекистане. – Ташкент: Фан, 1972, – 146 с.	Muzaffarov A. M. <i>Virashivanie vodorosley i vysshikh vodnykh rasteniy v Uzbekistane</i> [The Cultivation of algae and higher aquatic plants in Uzbekistan], Tashkent, Fan, 1972, 146 p. (in Russian)
4	Зудин Д.В., Кантера В.Н., Угодчиков Г.А., Автоматизации биотехнологических исследований. – Москва: "Высшая школа", 1987.	Zudin D.V., Kantera V.N., Ugodchikov G.A., <i>Avtomatizatsii biotekhnologicheskikh issledovaniy</i> [Automation of biotechnological research]. Moscow "Higher School", 1987. (in Russian)
5	Ш.Р. Рахмонов, Ш.Р. Убайдуллаева Математическое моделирование технологического процесса культивирования хлореллы // Журнал «Irrigatsiya va Melioratsiya». – Ташкент, 2019. Спец.выпуск. – С.132–134.	Sh.R. Rakhmonov, Sh.R. Ubaydullaeva <i>Matematicheskoye modelirovaniye tekhnologicheskogo protsesssa kul'tivirovaniya khloreilly</i> [Mathematical modeling of the technological process of chlorella cultivation]. Journal "Irrigation and Melioration". Tashkent. Special issue, 2019, Pp.132-134. (in Russian)
6	Перт С.Д. Основы культивирования микроорганизмов и клеток. Перевод Санг. (Под.ред. Н.Л. Роботневой). – Москва. "Мир", 1978. – 332 с.	Perth S.D. <i>Osnovy kul'tivirovaniya mikroorganizmov i kletok</i> [Fundamentals of the cultivation of microorganisms and cells]. Translation by Sang. (Edited by N.L. Robotneva). Moscow. "Mir" 1978. 332 p. (in Russian)
7	Sh.Rakhmonov, A.M.Nematov, N.Sh. Azizova, D.A.Abdullayeva and E.E.Tukhtaev. Mathematical modeling of the hydrodynamic structure of flows in the apparatus for cultivating Chlorella. Parametric identification of a mathematical model. ICECAE Deceber 2020 IOP Conference series Earth and Enviromental Science. 6/4:012152 doi:10.1088/1755-1315/614/1/012152	Sh.Rakhmonov, A.M.Nematov, N.Sh. Azizova, D.A.Abdullayeva and E.E.Tukhtaev. Mathematical modeling of the hydrodynamic structure of flows in the apparatus for cultivating Chlorella. Parametric identification of a mathematical model. ICECAE Deceber 2020 IOP Conference series Earth and Enviromental Science. 6/4:012152 doi:10.1088/1755-1315/614/1/012152
8	Бондарь А.Г. Математическое моделирование химико-технологических процессов. – Киев, Высшая школа, 1973. – 279 с.	Bondar A. G. <i>Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov</i> [Mathematical modeling of chemical and technological processes]. Kiev, 1973. Higher school, 279 p. (in Russian)
9	Блохина И.Н., Огаркев В.Н., Угоджаков Г.А. Управление процессами культивирования микроорганизмов. Горький Волго-Вятское кн. Издательство, 1983. – 173 с.	Blokhina I.N., Ogarkev V.N., Ugodgakov G.A. <i>Upravleniya protsessami kul'tivirovaniya mikroorganizmov</i> [Controlling the processes of cultivation of microorganisms]. Gorky Volgo-Vyatka book. Publishers, 1983. 173 p. (in Russian)
10	Рахманов Ш. Абдуганиев А. Реализация моделей и алгоритмов в задачах управления процессом культивирования хлореллы // Журнал «Агро илм». – Ташкент, 2020, – №2 (65). – С. 118-119, ISSN - 2091-5616	Rakhmonov sh. Abduganiev A. <i>Realizatsiya modeley i algoritmov v zadachakh upravleniya protsessom kultivirovaniya khloreilly</i> [Implementation of models and algorithms in problems of controlling the process of Chlorella cultivation]. Journal Agro ILM, Tashkent, 2020, No.2 (65), Pp. 118-119, ISSN-2091-5616. (in Russian)
11	Р.Т. Газиева, А.М. Нигматов, Э.О. Озодов Минимизация схем управления с помощью логических элементов // Журнал «Irrigatsiya va Melioratsiya». – Ташкент, 2020. – №1(19). – С. 64–66.	R.T. Gazieva, A.M. Nigmatov, E.O. Ozodov. <i>Minimizatsiya skhem upravleniya s pomoshch'yu logicheskikh elementov</i> [Minimizing control circuits using logic gates]. Journal "Irrigation and Melioration". Tashkent. 2020. Pp. 64-66. (in Russian)
12	Ш.Р. Убайдуллаева, Ш.Р. Рахмонов Кечикишга эга автоматик бошқариш тизимларнинг шарҳи «Irrigatsiya va Melioratsiya» журнали. Тошкент. Махсус сон, 2019, – Б.115–117.	Sh.R. Ubaydullaeva, Sh.R. Raxmonov. <i>Kechikishga ega avtomatik boshkarish tizimlarning sharhi</i> [Review of automatic control systems with delay]. Journal "Irrigation and Melioration". Tashkent. Special issue, 2019, Pp.115-117. (in Uzbek)
13	Бекмуратов Т.Ф., Камилов М.М., Рахимов Т.Н. Идентификация химико-технологических объектов. – Ташкент: Фан, 1970. – 183 с.	Bekmuratov T. F., Camel M. M., Rakhimov T. N. <i>Identifikatsiya khimiko-tekhnologicheskikh ob'ektov</i> [Identification of chemical and technological objects]. Tashkent: Fan. 1970. 183 p. (in Russian)
14	Бирюков В.Б., Кантере В.М. Оптимизация периодических микробиологического синтеза: – Москва: Наука, 1985. – 296 с.	Biryukov V. B., Kanter V. M. <i>Optimizatsiya periodicheskikh mikrobiologicheskogo sinteza</i> [Optimization of microbiological synthesis methods]. Moscow: Nauka. 1985. 296 p. (in Russian)
15	Васиьев М.Н., Амбросов В.А., Складнев А.А. Моделирование процессов микробиологического синтеза. – Москва: «Лесная промышленность», 1975. – 341 с.	Vasiyev M.N., Ambrosov V.A., Skladnev A.A. <i>Modelirovaniye protsessov mikrobiologicheskogo sinteza</i> [Modeling the processes of microbiological synthesis]. Moscow "Timber Industry" 1975. 341 p. (in Russian)
16	Рахманов Ш. Методы решения оптимального управления культивируемых микроводорослей // Ўзбекистон қишлоқ хўжалиги журнали. – Ташкент, Махсус сон. 2019, – С. 24-25.	Rakhmonov Sh. <i>Metody resheniya optimalnogo upravleniya kultivirovannykh mikrovodorosley</i> [Solution methods of optimal management of cultivated microalgae] Journal Agriculture of Uzbekistan]. Tashkent. Special edition. 2019, Pp.24-25. (in Russian)
17	Ахметов К.А., Исмаилов М.А. Математическое моделирование и управление технологическими процессами биохимического производства. – Ташкент: «Фан», 1986. – 96 с.	Akhmetov K.A., Ismailov M.A. <i>Matematicheskoe modelirovanie i upravlenie tekhnologicheskimi protsessami biokhimicheskogo proizvodstva</i> [Mathematical modeling and control of technological processes of biochemical production]. Tashkent, "Fan", 1986, 96 p.(in Russian)
18	Упитис В.В. Макро- и микроэлементы в оптимизации минерального питания микроводорослей. – Рига: Изд-во Зинатне. – 296 с.	Upitis V.V. <i>Makro- i mikroelementi v optimizatsii mineral'nogo pitaniya mikrovodorosley</i> [Makro - and micronutrients in the optimization of mineral nutrition of microalgae]. Riga, Publishing house Sinlge, 296 p.(in Russian)
19	Романовский О.М., Степанова Н.В., Чернявский Д.С. Математическая биофизика, Наука, 1978. – 304 с.	Romanovsky O. M., Stepanova N. V., Chernyavsky D. S. <i>Matematicheskaya biofizika</i> [Mathematical Biophysics], Nauka, 1978, 304 p. (in Russian)
20	Sh.Rakhmonov, A. Abduganiev, D. Abdullayeva, N. Azizova, A.Albaraliev and E.Kamalov. Automatic control system for the technological process of Chlorella cultivation. IOP Conf. series: Materials science and Engineering 883 (2020) 012086. doi: 10.1088/1757-899x/883(1)012086	Sh.Rakhmonov, A. Abduganiev, D. Abdullayeva, N. Azizova, A.Albaraliev and E.Kamalov. Automatic control system for the technological process of Chlorella cultivation. IOP Conf. series: Materials science and Engineering 883 (2020) 012086. doi: 10.1088/1757-899x/883(1)012086