

УДК 577.31+577.342

ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТА БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ¹

С. А. Вызулин², В. И. Вызулина³, Г. Ф. Копытов⁴, Д. И. Крыцын⁵

DEPENDENCE OF THE EFFECT OF BIOLOGICAL ACTION OF MAGNETOSTATIC WAVES ON RADIATION POWER

Vyzulin S. A., Vyzulina V. I., Kopytov G. F., Krytsyn D. I.

The impact of radiation power on the effect of biological action of magnetostatic waves on grain leaven has been studied experimentally. It has been established that the rate of biomass gain by irradiated microorganisms depends on the power on a resonant basis. The stationary phase has been observed during the process of biomass growth. The experiments have shown that the conditions of its realization depend on the radiation power level of magnetostatic waves and exposition time. The results obtained can be applied to create fundamentally new and environmentally sound technologies in agro-industrial complex, pharmacology, and medicine.

Введение

Задачи создания новых экологически чистых биотехнологий, поставленные перед наукой в конце XX в, придали дополнительный импульс исследованиям в области изучения влияний внешних воздействий на биологические объекты. Известно большое число работ, посвященных изучению эффектов действия различных по физической природе видов облучения (звукового, оптического, рентгеновского, радиоволнового) на биологические свойства живых объектов. В частности, установлено, что внешние воздействия электромагнитной природы могут существенно влиять на жизнедеятельность биологиче-

ских объектов. Эффект действия электромагнитных волн на биологические объекты зависит от мощности воздействующего излучения. Наиболее полно зависимость эффекта нетеплового действия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона волн от плотности потока мощности исследована для колициногенного штамма *E. Coli* C600 (e1) [1,2]. Было показано, что при увеличении плотности потока мощности от 0,01 до 0,1 мВт/см² эффект возрастал и достигал максимального значения, которое не менялось даже при 10 мВт/см². Данная зависимость была подтверждена результатами исследований влияния миллиметровых волн на индуцибельный синтез пенициллина у *Staph. Aureus* [3]. В [4,

¹Работа выполнена при поддержке администрации Краснодарского края и РФФИ (03-04-96789), гранта Президента РФ (НШ-2107-2003.1).

²Вызулин Сергей Александрович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры радиофизики и радиоэкологии Кубанского государственного университета.

³Вызулина Виктория Игоревна, начальник Краснодарского центра стандартизации, метрологии и сертификации.

⁴Копытов Геннадий Филиппович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и радиоэкологии Кубанского государственного университета.

⁵Крыцын Данил Иванович, аспирант кафедры радиофизики и радиоэкологии Кубанского государственного университета.

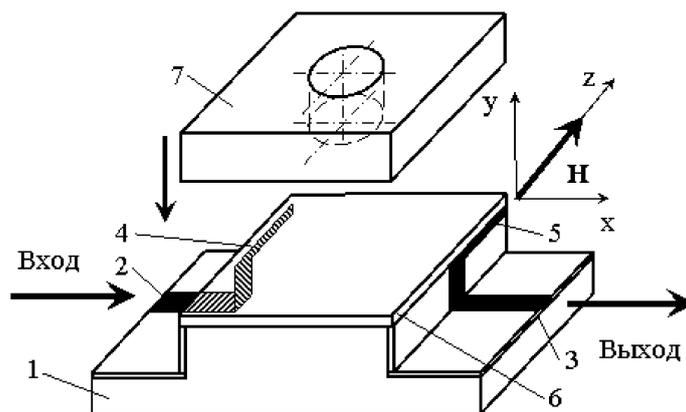


Рис. 1. Конструкция МСВ ячейки

5] впервые экспериментально показана возможность управления процессом роста дрожжей с помощью качественно нового механизма — излучения магнитоэлектрической волны (МСВ). В настоящей работе представлены результаты исследований влияния мощности излучения МСВ волн на биологическую активность хлебных дрожжей.

1. Облучение дрожжей магнитоэлектрическими волнами (МСВ)

МСВ — один из видов электромагнитных возмущений. Эти волны возбуждаются в намагниченных средах, обладающих магнитной упорядоченностью — ферромагнетиках или ферритах. Для МСВ характерно преобладание магнитной составляющей поля над электрической, поскольку переносимая магнитная энергия значительно больше электрической. Дисперсионные свойства МСВ позволяют на одной и той же частоте реализовать длины возмущений от нескольких единиц микронов до нескольких миллиметров за счет изменения напряженности внешнего поля подмагничивания. В частности, несложно возбудить МСВ в СВЧ диапазоне (от 3 до 30 ГГц) с величиной пространственного периода сравнимой с размерами микроорганизмов. Для «обычных» радиоволн аналогичная длина волны достигается в диапазонах крайне высоких и гипервысоких частот (от 100 ГГц до 10 ТГц).

Облучение дрожжей осуществлялось с помощью установки, обеспечивающей воздействие на исследуемую культуру излучения

МСВ с заданными параметрами — частотой и уровнем падающей мощности. Оригинальным в установке является устройство на магнитоэлектрических волнах — МСВ ячейка. Она представляет собой макет полосно-пропускающего фильтра (рис. 1). В состав МСВ ячейки входят: немагнитное металлическое основание 1; входная 2 и выходная 3 линии; возбуждающий 4 и приемный 5 преобразователи; ферритовая пленка 6; немагнитный металлический экран 7, со сквозным отверстием для пробирки с облучаемым веществом. Входная и выходная линия, возбуждающий и приемный преобразователи выполнены в виде отрезков микрополосковых линий передачи методом фотолитографии на поликорковых подложках. Ферритовый образец размещается непосредственно на металлическом основании над преобразователями и сверху накрывается металлическим экраном. Основание и экран заземлены. Вся конструкция помещается между полюсами магнита, создающего статическое поле подмагничивания H .

Принцип работы МСВ ячейки заключается в следующем.

Статическое магнитное поле приводит ферритовый образец в состояние магнитного насыщения, при котором ориентация всех спинов (магнитных моментов электронов) одинакова. Входной сверхвысокочастотный (СВЧ) электромагнитный сигнал по линии передачи 2 поступает на преобразователь 4, который служит для преобразования энергии электромагнитной волны в энергию МСВ. Если частота входного электромагнитного сигнала попадает в частотный диапазон

существования МСВ, то магнитная составляющая СВЧ-поля вокруг преобразователя вызывает колебания ближайших к нему спинов. (Значения граничных частот этого диапазона зависят от ориентации и напряженности магнитного поля смещения). Эти возмущения намагниченности распространяются по ферритовому образцу. Магнитное поле волны, достигающей приемного преобразователя 5, возбуждает в нем СВЧ-ток. Тем самым осуществляется обратное преобразование энергии МСВ в энергию электромагнитной волны. СВЧ-ток по линии передачи 3 поступает на выход устройства. Используя принцип раздельного выделения и детектирования сигналов падающей и прошедшей волн, можно наблюдать и измерять параметры магнитостатических волн, возбуждаемых в МСВ ячейке.

В проведенных опытах в МСВ ячейке возбуждались поверхностные магнитостатические волны, так как направление распространения возмущений намагниченности в плоскости ферритовой пленки было ортогонально к касательному полю подмагничивания. Устройство имело величину минимальных вносимых потерь 6–10 дБ при расстоянии между преобразователями 20 мм и развязке более 25 дБ.

Бегущие волны намагниченности создают переменное магнитное поле над ферритовой пленкой. В области размещения пробирки с облучаемым веществом напряженность этого поля определяется соотношением

$$h = \text{grad } \Psi, \quad (1.1)$$

где

$$\Psi = \Psi_0 \exp(-ky + ikx);$$

Ψ_0 — амплитуда; k — волновое число МСВ; ось y совпадает с направлением нормали к плоскости ферритового образца; $z \parallel H$; начало декартовой системы координат $Oxyz$ расположено так, что поверхности ферритового слоя описываются соотношениями $y = \pm d/2$.

Волновое число поверхностной МСВ можно вычислить по формуле

$$k = -\frac{1}{2d} \ln \frac{(\omega_H + \frac{\omega_M}{2})^2 - \omega^2}{(\frac{\omega_M}{2})^2}, \quad (1.2)$$

где d — толщина ферритового слоя; $\omega_H = \gamma H$; $\omega_M = 4\pi\gamma M$; $\omega = 2\pi f$; γ — гиромангнитное отношение; H — напряженность постоянного поля подмагничивания; M — намагниченность; f — частота.

Из (1.1) и (1.2) видно, что для длинноволновых возбуждений намагниченности с $\lambda > 0,5$ мм, где $\lambda = 2\pi/k$ — длина МСВ, существует относительно толстый приповерхностный слой над ферритовым образцом, где структура волны практически не изменяется. В ферритовой пленке из иттрий железного граната с параметрами $\gamma = 2,8$ МГц/Э, $4\pi M = 1750$ Гс и толщиной 40 микрон он может быть больше в несколько, а то и в десятки раз, линейных размеров микроорганизма.

Разработанная МСВ ячейка не только позволяет эффективно облучать порцию дрожжей в количестве, достаточном для проведения исследований, но и обеспечивает заданную величину пространственного периода излучения магнитостатических волн.

В МСВ ячейку вставлялась пробирка с дрожжами. Она представляет собой пластиковую трубку с внутренним диаметром 9 мм, с одной стороны которой наклеена тефлоновая пленка толщиной 30 мкм.

Облучению подвергались сухие хлебные дрожжи. Время экспозиции — 15 мин. Уровень падающей мощности в каждом опыте был постоянным и контролировался с помощью цифрового ваттметра. Его можно было изменять путем введения дополнительного затухания в линию передачи между генератором и МСВ ячейкой. Мощность МСВ можно оценить (завышенная оценка), используя коэффициент передачи ячейки на частоте воздействия при соответствующем значении напряженности поля подмагничивания. В экспериментах, описанных ниже, она составляет примерно 0,01 часть падающей высокочастотной мощности.

2. Контроль роста биомассы

Классическим для радиотехники приемом исследований эффектов взаимодействия излучения с веществом является изучение спектров поглощения или вторичного излучения исследуемого объекта. Снятие спектров взаимодействий МСВ с биологической средой, в том числе на основе хлебных или винных дрожжей, традиционными радиотехническими методами обычно практически невозможно по причине недостаточной чувствительности современных измерительных комплексов. Поэтому при исследовании влияния излучений на биологические системы изучают-

ся, как правило [6], так называемые спектры действия — зависимости биологического эффекта действия от параметров облучения.

В нашем случае изучение влияния излучения на биологическую активность исследуемых микроорганизмов проводилось с использованием критерия изменения относительной скорости прироста биомассы в процессе роста дрожжей по сравнению с контрольным (необлученным) образцом.

Дрожжи после облучения помещались в питательную среду, представляющую собой 3% раствор сахара в воде. Для контроля процесса роста микроорганизмов использовался фотометрический метод. Сущность метода заключается в том, что через пробирку, содержащую исследуемую культуру в растворе с питательной смесью, пропускается модулированный по амплитуде световой луч, генерируемый светодиодом. По изменению интенсивности сигнала на выходе из пробирки можно судить об изменении плотности биомассы. Наблюдения процессов роста биомассы проводились в течение от 3,5 до 48 ч с момента размещения пробирки с исследуемым образцом в установке. При продолжительных экспериментах неизбежно «плавание» амплитуды зондирующего светового сигнала, обусловленное температурным дрейфом, изменениями напряжения питания и т.п. Для учета этого обстоятельства наряду с амплитудой выходного сигнала регистрировалась амплитуда зондирующего светового сигнала.

Временные зависимости уровней входного и выходного сигналов в процессе роста дрожжей записывались с помощью оригинальной автоматизированной лабораторной установки. Дискретность сбора информации не хуже 1 с.

В рамках теоретической модели, основанной на допущении, что среда распространения — раствор питательной смеси с дрожжами, является линейной, можно получить выражение, связывающее измеряемые параметры (амплитуды входного и выходного сигналов) с относительной концентрацией дрожжей в растворе с питательной смесью

$$\delta n = \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{n - n_0}{n_0} = K \ln\left(\frac{V_{\text{вых}} \tilde{V}_0}{V_{\text{вых0}} \tilde{V}}\right) / \ln\left(\frac{V_{\text{вых0}}}{\tilde{V}_0}\right). \quad (2.1)$$

В (2.1) δn — относительный прирост биомассы; Δn — абсолютный прирост биомассы; n_0 и n — начальная и текущая концентрации микроорганизмов; K — коэффициент, определяемый при калибровке; $V_{\text{вых0}}$ и $V_{\text{вых}}$ — начальное и текущее значения амплитуды выходного сигнала. Параметры \tilde{V}_0 и \tilde{V} определяют значения амплитуд выходного сигнала в начальный и текущий моменты времени при уровнях входного сигнала $V_{\text{вх0}}$ и $V_{\text{вх}}$ в ситуации, когда в пробирке только раствор с питательной смесью. Они вычисляются по формуле

$$\tilde{V} = k_0 + k_1 V_{\text{вх}}, \quad (2.2)$$

где k_0 и k_1 — коэффициенты установки, определяются экспериментальным путем; $V_{\text{вх}}$ — амплитуда входного сигнала.

По формулам (2.1) и (2.2), используя экспериментальные данные $V_{\text{вх}}(t)$ и $V_{\text{вых}}(t)$, где t — время, были рассчитаны временные зависимости изменений относительного объема биомассы в процессе роста дрожжей.

3. Влияние мощности излучения

Зависимость эффекта действия от мощности излучения МСВ волны исследована для двух ситуаций — условно названных режимами повышения и подавления биологической активности микроорганизмов.

Получены временные зависимости относительного (по сравнению с контрольным образцом) изменений объема биомассы в процессе роста хлебных дрожжей, иллюстрирующие результаты действия МСВ различной мощности.

3.1. Режим повышения активности

Воздействие осуществлялось при напряженности поля подмагничивания 740 Э в диапазоне частот от 4000 до 4100 МГц (длина волны в интервале от 1,6 до 1,0 мм). Именно для таких значений напряженности поля подмагничивания и частот воздействия ранее [5] наблюдалось максимальное увеличение биологической активности хлебных дрожжей. (В указанных исследованиях, мощность электромагнитного излучения, подаваемого на МСВ ячейку, была постоянной и имела величину порядка 0,4 мВт).

Зависимости нормированного прироста биомассы от уровня падающей мощности P

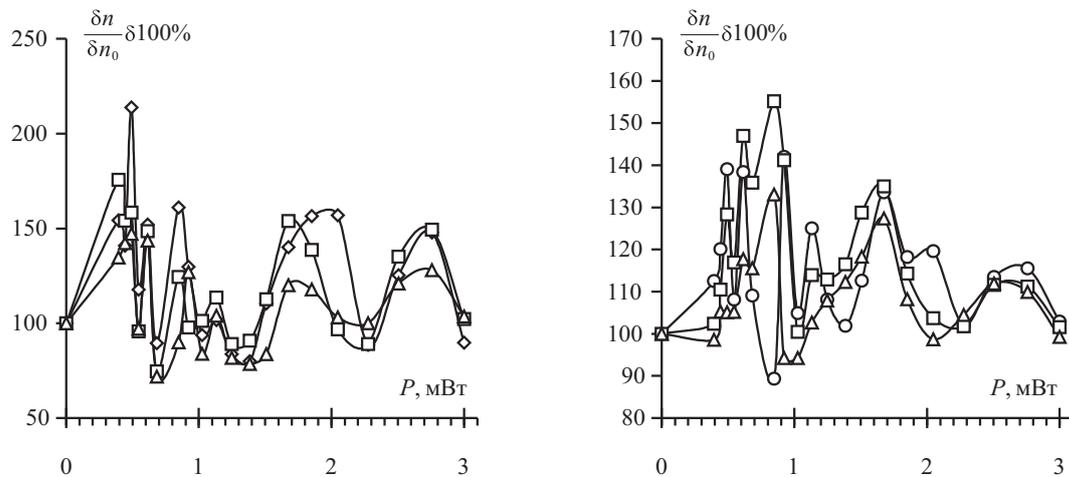


Рис. 2. Зависимость относительного прироста биомассы от уровня падающей мощности

для различных значений t — времени с момента начала роста дрожжей продемонстрированы на рис. 2 (кривые 1–6 для $t = 0,5; 1; 2,5; 5; 10$ и 15 ч соответственно). Видно, что зависимость $\delta n/\delta n_0$ (δn — относительный прирост для облученного образца, δn_0 — для контрольного) от P (при фиксированном значении t) не монотонна. На ней имеет место чередование максимумов и минимумов. В процессе развития дрожжей положение наблюдаемых экстремумов практически не изменяется. Варьируя уровень мощности внешнего излучения, можно изменять эффект повышения биологической активности дрожжей, либо даже реализовать эффект ее подавления. Для всех исследованных значений P от $0,4$ до $3,0$ мВт эффект от облучения наиболее сильно проявляется на начальном этапе роста дрожжей ($t \leq 1$ ч). В этом случае отношение скоростей роста облученного и контрольного образцов может достигать величины порядка 200 – 250 %. По мере увеличения t эффект действия нивелируется. Наиболее сильно это проявляется для ситуаций, когда мощность излучения МСВ невелика (уровень падающей мощности P менее 1 мВт). Наблюдаемое с ростом t сближение зависимостей $\delta n(t)$ и $\delta n_0(t)$ указывает на обратимый характер влияния коротковолнового сверхвысокочастотного магнитного излучения на биологическую активность микроорганизмов.

3.2. Режим подавления активности

Микроорганизмы облучались излучением МСВ с частотами от 6 100 до 6 200 МГц (длина

волны в интервале от 6 до $1,6$ мм). Напряженность поля подмагничивания была равна 1470 Э. Такой выбор параметров облучения, как и в предыдущем случае, определялся по признаку максимальности эффекта подавления биологической активности дрожжей, наблюдаемого при $P \approx 0,4$ мВт [5]. Уровень падающей мощности изменялся от $0,12$ до $1,2$ мВт.

Графики зависимостей относительного (по сравнению с контрольным образцом) прироста биомассы от уровня мощности электромагнитного излучения, подаваемого на МСВ ячейку, для различных значений времени с момента начала роста дрожжей представлены на рис. 3 (кривые 1–6 для $t = 0,5; 1; 2,5; 5; 10$ и 15 ч соответственно). На зависимости $\delta n/\delta n_0$ от P при $t = \text{const}$ наблюдается чередование максимумов и минимумов. В процессе роста микроорганизмов одни экстремумы могут исчезать, либо появляться новые экстремумы. Более того, может происходить изменение типа экстремума. Например, в точке $P = 0,3$ мВт при $t = 1$ ч имеет место максимум, а при $t = 10$ ч — минимум. Все это указывает на то обстоятельство, что воздействие излучением МСВ по-разному проявляет себя в первых (двух – четырех) поколениях и в последующих (шестых – двенадцатых) поколениях облученных дрожжей. Следует отметить, что после 24 – 30 ч с момента начала роста эффект от облучения, как правило, нивелируется.

Полученные результаты позволяют предположить, что, оптимизируя облучение МСВ по мощности, можно усилить эффект как

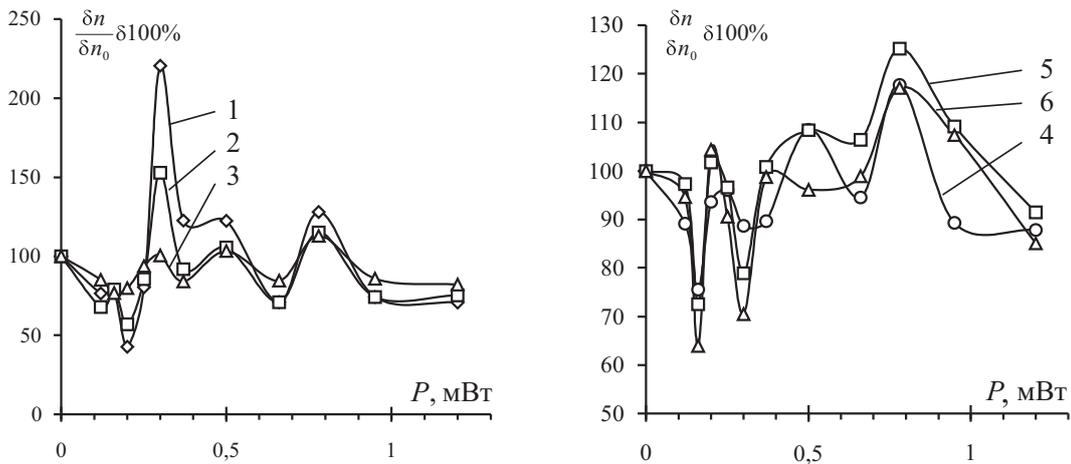


Рис. 3. Зависимость относительного прироста биомассы от уровня падающей мощности

повышения, так подавления биологической активности дрожжей на различных этапах (вплоть до десятого – двенадцатого поколения) их роста.

4. Эффект остановки роста биомассы

Представляет интерес сравнение динамики плотности биомассы при проращивании облученных и необлученных дрожжей. Для контрольного образца зависимость $\delta n(t)$ при $t \leq 48$ ч монотонна (рис. 4, кривая 1). Для облученной культуры на кривой роста может возникать горизонтальное плато (рис. 4, кривые 2–4). По истечении некоторого времени стационарная фаза заканчивается, и дрожжи вновь начинают расти. Существование стационарной фазы в процессе развития дрожжей наблюдалось только в ситуациях, когда воздействие осуществлялось в диапазоне частот от 6 100 до 6 200 МГц при напряженности поля подмагничивания 1 470 Э (режим подавления активности). Параметры, характеризующие эффект при фиксированном времени облучения — время остановки и длительность временного интервала остановки роста дрожжей, зависят от уровня падающей мощности. Например, при $P = 0,16$ мВт временной интервал остановки роста дрожжей наступил при $t \approx 8,5$ ч и был равен примерно 15 ч. Аналогичные параметры при $P = 0,3$ мВт равны 7,5 ч и 12–14 ч, а при $P = 0,78$ мВт — 11,5 и 5 ч. Время облучения в этих случаях — 15 мин.

Проявление эффекта остановки роста биомассы зависит и от времени экспозиции.

Например, после облучения в течение 5 мин с уровнем падающей мощности 0,3 мВт остановка роста наступает при $t \approx 11,5$ ч и длится примерно 3 ч.

Возможность существования стационарной фазы в процессе роста биомассы микроорганизмов предсказывается теоретически [7]. Наличие плато на кривой роста объясняется тем, что в популяции смертность и размножение компенсируют друг друга. В ходе дальнейшей эволюции, согласно модели, с ростом ограничений по питательному субстрату наступает фаза отмирания. Факт наблюдения роста биомассы после стационарной фазы, свидетельствует, что питательные ресурсы еще не исчерпаны. Существование стационарной фазы в данном случае, возможно, объясняется рождением в течение нескольких поколений значительного числа нежизнеспособных и/или не способных к делению микроорганизмов. Для проверки этой гипотезы необходимы дополнительные исследования, в том числе и с привлечением методов визуального контроля.

Заключение

Изучено влияние мощности излучения на эффект биологического действия МСВ на хлебные дрожжи. Показано, что зависимость скорости прироста биомассы облученных микроорганизмов от мощности имеет резонансный характер. Варьируя уровень мощности внешнего излучения можно усиливать как подавление, так и повышение биологической активности микроорганизмов. Влияние

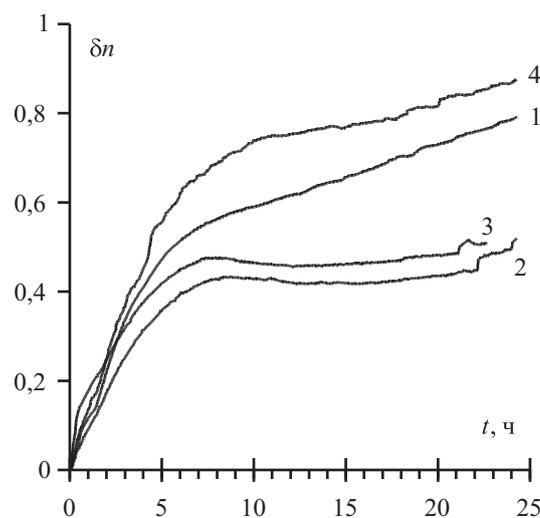


Рис. 4. Временные зависимости изменений относительного объема биомассы в процессе роста дрожжей: 1 — контрольный образец, 2–4 — образцы, облученные соответственно при 0,16, 0,3 и 0,78 мВт

облучения МСВ может проявляться на различных этапах (вплоть до десятого – двенадцатого поколения) роста дрожжей. Наблюдался эффект остановки роста облученных дрожжей, проявляющийся в том, что через некоторое время после начала роста микроорганизмов плотность биомассы в течение достаточно продолжительного периода времени практически не изменяется. Параметры реализации стационарной фазы — время остановки и длительность временного интервала остановки роста дрожжей, зависят от уровня мощности излучения МСВ и времени экспозиции.

Литература

1. Смолянская А. З., Виленская Р. Л. Действие электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на функциональную активность некоторых генетических элементов бактериальных клеток // УФН. 1973. Т. 110. В. 3. С. 458–460.
2. Виленская Р. Л., Гельдович Э. А., Голант М. Б., Смолянская А. З. О характере воздействия миллиметрового излучения на синтез колицина // Научн. докл. высш. школы. Биол. науки. 1973. № 7. С. 69–71.
3. Смолянская А. З., Гельдович Э. А., Голант М. Б. и др. Резонансные явления при действии электромагнитных волн миллиметрового диапазона на биологические объекты // Успехи современной биологии. 1979. Т. 87. В. 3. С. 381–392.
4. Вызулин С. А., Вызулина В. И. Влияние излучения магнитостатических волн на биологическую активность микроорганизмов // Новые магнитные материалы микроэлектроники: Труды XIX Междунар. школы-семинара. М., 2004. С. 277–279.
5. Вызулин С. А., Вызулина В. И., Крыцын Д. И. Эффект действия излучения магнитостатических волн на биологическую активность микроорганизмов // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2004. № 4. С. 28–33.
6. Голант М. Б., Шашлов В. А. К вопросу о механизме возбуждения колебаний в клеточных мембранах слабыми электромагнитными полями / Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине. Под ред. Н. Д. Девяткова. М.: ИРЭ АН СССР, 1985. С. 127–131.
7. Шельх И. А., Шелегедин В. Н. Математическая модель роста биомассы микроорганизмов в отсутствие лимитирующего субстрата и ингибирующих агентов // Биофизика. 2000. Т. 45. В. 5. С. 882–887.

Статья поступила 3 августа 2005 г.

Кубанский государственный университет

© Вызулин С. А., Вызулина В. И., Копытов Г. Ф., Крыцын Д. И., 2005