

УДК 574.34

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛЕННОСТИ  
МИКРООРГАНИЗМОВ ПРИ ОЧИСТКЕ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННОЙ  
ПОЧВЫ МЕТОДОМ БИОРАЗЛОЖЕНИЯ**

**Нуриаслямова Р.Б.**, студентка

**Бигаева Л.А.**, к.ф.-м.н., доцент

БФУУНиТ, г. Бирск, Россия

**Аннотация:** Рассматривается использование микроорганизмов для очистки загрязнённых нефтью грунтов. Для решения этой проблемы предлагается использовать биологический метод очистки с применением специальных биопрепаратов, содержащих микроорганизмы. Предложена модель очистки почв от нефтепродуктов методом биоразложения.

**Ключевые слова:** Моделирование, нефтезагрязнённая почва, микроорганизмы, C#.

В современном мире проблема загрязнения окружающей среды является наиболее актуальной и значимой. Нефтяная промышленность опасна для экологического баланса и может вызвать последствия на разных уровнях: вода, воздух, почва, и, следовательно, все живые существа. Негативное влияние загрязнения нефтью почвы могут вызывать: нарушение ландшафтов местности и исчезновения сельскохозяйственных земель; сокращение биоразнообразия; загрязнение воздушного бассейна вследствие испарения углеводородов вокруг нефтепромыслов; повышение уровня подземных вод и образование маленьких засоленных озёр; изменение плотности, уменьшение прозрачности воды, гибель живых организмов[2].

На сегодняшний день существует множество методов очистки почвы и грунтовых вод от нефтепродуктов. Среди них испарение загрязняющих веществ в почве, биологическая очистка, складирование почвы с последующей

самоочисткой, экскавация загрязнённого грунта с его последующим захоронением или термической обработкой.

Из всех технологий ликвидации последствий загрязнения почв нефтепродуктами наиболее экологически безопасной считается биоочистка на месте загрязнения. Эта технология обладает рядом преимуществ: простотой установки и эксплуатации, а также сравнительно низкими финансовыми затратами. В течение 29 лет она успешно применяется во многих странах для очистки почвы от бензина, дизельного топлива и других нефтепродуктов.

Биоремедиация – это процесс использования живых организмов, таких как бактерии, дрожжи, грибы, водоросли и растения, для детоксикации загрязняющих веществ или снижения их концентрации в окружающей среде. Она применяется для очистки загрязнённых почв, грунтов, водоёмов, отходов горнодобывающей промышленности и других объектов.

Микроорганизмы, используемые для биоремедиации, обычно включают бактерии, грибы и археи, каждый из которых имеет уникальные механизмы деградации углеводородов нефти.

Исследование динамики микроорганизмов и их взаимодействия с загрязняющими веществами играет ключевую роль в понимании и улучшении процессов биоремедиации нефтезагрязнённых территорий. Оно включает разработку и анализ математических моделей, позволяющих прогнозировать влияние различных факторов на скорость и эффективность биodeградации, что имеет решающее значение для оптимизации методов очистки [5].

В качестве математической модели, рассмотрим следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dM(t)}{dt} = M(t) \left( \alpha \frac{(M_0 - M(t))}{K_1 + M(t)} - \beta \frac{(M_0 - M(t))(C(t) - \gamma)}{(K_1 + M(t))(K_2 + C(t))} - \frac{\tau C(t)}{(t + 0,9)^4} \right), \\ \frac{dY(t)}{dt} = Y(t)(\nu(C(t) + S) - \eta Y(t)), \\ \frac{dC_1(t)}{dt} = -C_1(t) \left( \lambda M_0 - \frac{C_1(t)}{K_2 + C_1(t)} \cdot \left( \frac{\mu_1 M(t)}{K_1 + M(t)} + \mu_2 Y(t) \right) \right), \\ \frac{dC_2(t)}{dt} = -\delta C_2(t), \\ C(t) = C_1(t) + C_2(t), \end{array} \right.$$

где  $M$ —концентрация биомассы микроорганизмов,  $\alpha$  - коэффициент естественного прироста,  $\beta$  — количество поллютанта, который разлагает 1 грамм биомассы микроорганизмов,  $m$  — пористость почвы, то есть количество пор, которые есть в почве,  $\mu$  – коэффициент биодegradации,  $K$  – концентрация субстрата,  $C_1(t)$  - концентрация части нефти, разлагаемой под воздействием биологических факторов почвы,  $C_2(t)$  - концентрация части нефти, разлагаемой под воздействием физико-химических факторов почвы,  $M(t)$  - концентрация биомассы микроорганизмов,  $t$ - время,  $S$  — влагонасыщенность почвы, степень насыщения почвы влагой,  $\gamma$  – константа, определяющая степень загрязнения, при которой нефть выступала в роли стимулятора почвенной микробиоты [4].

Математическая модель написана на основе функции Моно, описывающую скорость роста микроорганизмов в зависящую от концентрации субстрата (в данном случае — нефтепродуктов):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC(t)}{dt} = -\frac{\alpha \mu C(t)}{C(t) + K} M(t), \\ \frac{dM(t)}{dt} = \frac{\mu C(t)}{C(t) + K} M(t) - \lambda M(t). \end{array} \right.$$

Далее она была усовершенствована включением трёх факторов, влияющих на процесс разложения нефти: 1) физико-химические факторы; 2) микробиоту и почвенные ферменты, находящиеся в почве в момент внесения в неё нефти; 3) микробиоту и почвенные ферменты, сохранившиеся в природно-технической системе, возникшие после внесения нефти [1].

На основе математической модели коэффициентов[3]:

$$\alpha = 0,015; \beta = 0,28; \delta = 1,13; \lambda M_0 = 0,017; \sigma = 0,78;$$

$$\mu = 0,005; \tau = 2,4; \gamma = 2; K_1 = 1; K_2 = 50;$$

была написана программа наC#:

```
namespace VodopyanovaModel
{
    class Program
    {
        private const double alpha = 0.015; // Убыль
        private const double beta = 0.28; // Рост микроорганизмов
        private const double mu = 0.5;
        private const double K1 = 1.0;
        private const double K2 = 50.0
        private const double dt = 1; // Шаг времени
        private const int N = 100; // Число пространственных узлов
        static void Main(string[] args)
        {
            double[] C = new double[N]; // Концентрация микроорганизмов
            double[] M = new double[N]; // Концентрация загрязняющих веществ
            for (int i = 0; i < N; i++)
            {
                C[i] = 6000;
                M[i] = 0.5;
            }
            Console.WriteLine("Время\tКонцентрация C\tКонцентрация M");
            for (double time = 1; time <= 10; time += dt)
            {
                double[] C_new = new double[N];
                double[] M_new = new double[N];
                for (int i = 0; i < N; i++) {
                    double growthC = beta * C[i] * M[i] / (K1 + C[i]);
                    double lossC = alpha * C[i];
                    double growthM = mu * C[i] / (K1 + C[i]) * M[i] / (K2 + M[i]);
                    C_new[i] = C[i] + dt * (growthC - lossC);
                    M_new[i] = M[i] + dt * (growthM - alpha * M[i]); }
                C = C_new; M = M_new;
                double avgC = CalculateAverage(C);
            }
        }
    }
}
```

```

double avgM = CalculateAverage(M);
Console.WriteLine($"{time:F2}\t{avgC:F4}\t{avgM:F4}");
Console.ReadKey();
private static double CalculateAverage(double[] array)
    {double sum = 0;
foreach (double value in array)
    {sum += value;}
return sum / array.Length;}}

```

Таблица 1. Результат вычисления программы

Время (дни)	Численность микроорганизмов (КОЕ)	Концентрация нефти (г/см <sup>3</sup> )
1	6066,774	552,0589
2	6130,323	544,2365
3	6190,73	536,5308
4	6248,073	528,9401
5	6302,432	521,4627
6	6353,882	514,097
7	6402,498	506,8411
8	6448,354	499,6936
9	6491,521	492,6526
10	6532,07	485,7167

В таблице 1 показан результат вычисления программы на C#.

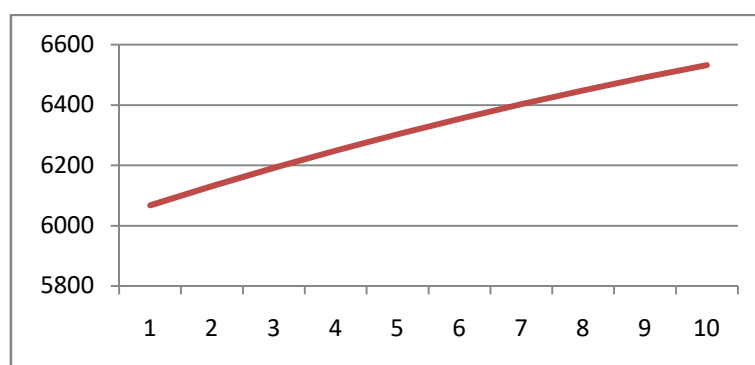


Рисунок 1. График, показывающий изменение числа микроорганизмов

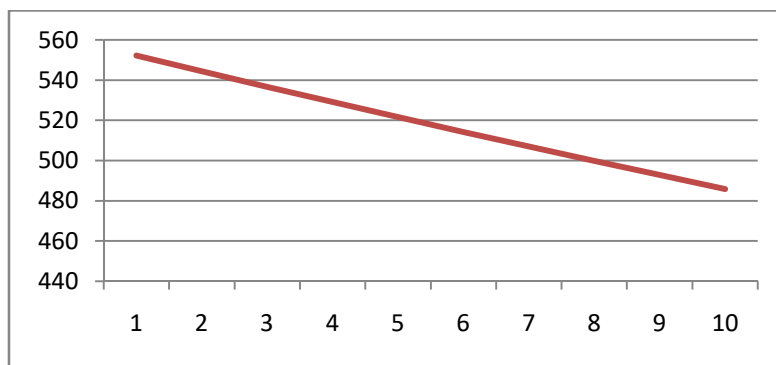


Рисунок 2. График, показывающий изменение концентрации нефти в почве

На рисунках 1 и 2 визуализировано как развиваются микроорганизмы в почве, загрязнённой нефтью и как меняется концентрация нефти в почве.

Таким образом, была протестирована математическая модель, которая может быть использована для очистки почв методом биоремедиации.

### Литература

1. Ахкямова, А. И. Моделирование численности микроорганизмов как важный инструмент оптимизации процесса очистки нефтезагрязненной почвы / А. И. Ахкямова, Л. А. Бигаева // Обратные задачи и математические модели : Сборник научных трудов, Бирск, 22 сентября 2023 года. – Бирск: Уфимский университет науки и технологий, 2023. – С. 123-124.
2. Веницианов, Е. В. Расчет процесса биологической очистки подземных вод и почв от нефтяных загрязнений на основе математической модели / Е. В. Веницианов, Д. В. Коннов, И. С. Пашковский // Экология промышленного производства. – 2006. – № 4. – С. 24-28.
3. Водопьянов В. В. Математические модели и методы анализа восстановления биосистем, подверженных антропогенным воздействиям (на примере восстановления нефтезагрязненных почв): специальность: 05.13.18 - математическое моделирование, численные методы и комплексы программ : дис. ... доктор технических наук / Водопьянов Владимир Васильевич; Уфимский гос. авиационный технический ун-т – Уфа, 2008.-94с

4. Чеботарева, Э. В. Математические модели изменения концентрации нефти в загрязненных почвах под действием сорбентов и микроорганизмов / Э. В. Чеботарева // Филология и культура. – 2011. – № 4(26). – С. 47-50. – EDN OZMJYP.

5. Чиненов, Н. В. Влияние нефти на почвенный микробиоценоз / Н. В. Чиненов, Е. Н. Гончарова // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология : Сборник докладов международной научной конференции, Алушта, 05–09 июня 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 280-282.