

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, α - коэффициент естественного прироста, β — количество поллютанта, который разлагает 1 грамм биомассы микроорганизмов, m — пористость почвы, то есть количество пор, которые есть в почве, μ – 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, γ – 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 ³)
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#.

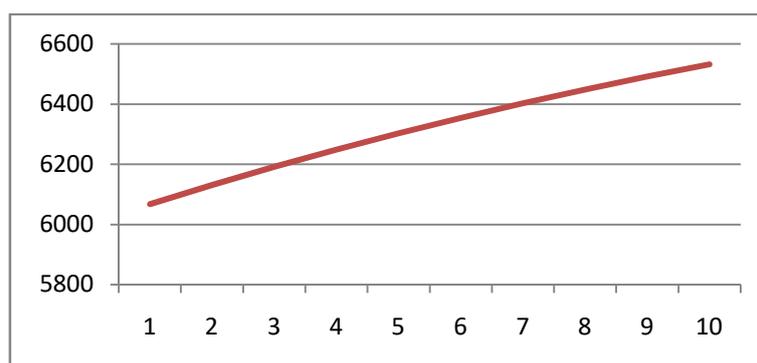


Рисунок 1. График, показывающий изменение числа микроорганизмов

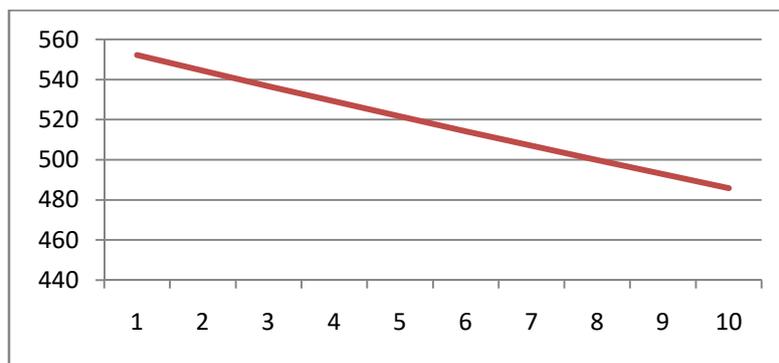


Рисунок 2. График, показывающий изменение концентрации нефти в почве

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.