УДК 621.648

ЦИФРОВАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

DIGITAL ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION FACTORS IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

Григулецкий Владимир Георгиевич
доктор технических наук,
профессор,
заведующий кафедрой высшей математики,
Кубанский государственный аграрный университет
имени И.Т. Трубилина
gvg-tnc@mail.ru

Савенок Ольга Вадимовна
доктор технических наук,
профессор кафедры разработки
и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II
Savenok_OV@pers.spmi.ru

Аннотация. В статье приведена цифровая оценка экологических факторов охраны окружающей среды в нефтегазовой промышленности – представлен краткий обзор и анализ существующих технологий утилизации, мелиорации и рекультивации почв, загрязнённых нефтью и нефтепродуктами; предложена новая цифровая методика оценки влияния экологических факторов при охране окружающей среды в нефтегазовой промышленности; приведены примеры расчётов, показывающие хорошее соответствие опытных и расчётных параметров.

Ключевые слова: цифровая оценка экологических факторов; деструкция нефти в почве; применение нефтеокисляющих бактерий; аэробные нефтеокисляющие бактерии; технологии утилизации, мелиорации и рекультивации почв, загрязнённых нефтью и нефтепродуктами; новая цифровая методика оценки влияния экологических факторов; охрана окружающей среды в нефтегазовой промышленности.

Griguletsky Vladimir Georgievich
Doctor of Technical Sciences,
Professor,
Head of the Department
of Higher Mathematics,
Kuban State Agrarian University
named After I.T. Trubilin
gvg-tnc@mail.ru

Savenok Olga Vadimovna
Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Development
and Operation of Oil and Gas Fields,
St. Petersburg Mining University
of Empress Catherine II
Savenok_OV@pers.spmi.ru

Annotation. The article presents a digital assessment of environmental factors of environmental protection in the oil and gas industry – a brief overview and analysis of existing technologies for the disposal, melioration and reclamation of soils contaminated with oil and oil products; a new digital methodology for assessing the impact of environmental factors in environmental protection in the oil and gas industry is proposed; examples of calculations are given that show good agreement between experimental and calculated parameters.

Keywords: digital assessment of environmental factors; destruction of oil in soil; use of oil-oxidizing bacteria; aerobic oil-oxidizing bacteria; technologies for utilization, melioration and reclamation of soils contaminated with oil and oil products; new digital methodology for assessing the impact of environmental factors; environmental protection in the oil and gas industry.

Чем больше мы берём от мира,
тем менее мы оставляем в нём,
и в конечном итоге мы вынуждены
будем оплатить наши долги в тот самый
момент, который может оказаться
очень неподходящим для того,
чтобы обеспечить продолжение нашей жизни.
Норберт Винер

Введение

А.И. Булатов, П.П. Макаренко, В.Ю. Шеметов в монографии [1] впервые установили основные понятия и законы экологии применительно к производственной деятельности нефтегазовой промышленности; производственная деятельность предприятий связана с техногенным воздействием на природную среду и оказывает значительное негативное воздействие на окружающую среду.

В частности, в книге [1] отмечается, что ежегодный интегральный ущерб, наносимый только природной среде Западной Сибири процессами добычи нефти и газа, в том числе процессами строительства скважин, рассчитанный институтом «ЛенГИПРОгор», оценивается в 14,7 млрд руб. в ценах 1985 года; по данным «СибрыбНИИпроект» (г. Тюмень) из 47 видов ценных промысловых рыб Обского бассейна с начала освоения Западной Сибири (с 1964 года) в настоящее время (1988 год) сохра-

нился только 21 вид; рыбной промышленности региона нанесён большой урон, что связано со значительным уровнем нефтяного загрязнения водных объектов.

Характеризуя основные понятия и законы экологии, в монографии [1] отмечается, что *экосистема представляет основную структурную единицу биосферы*; в почвенной среде органические вещества (нефть, нефтепродукты, мазут и т.д.) минерализуются не полностью, а трансформируются в сложный комплекс производных органических кислот – гумус ([1], стр. 14); производство живой материи (биомассы) – один из фундаментальных процессов биосферы; планета Земля представляет основную среду жизни для живых организмов.

Факторы среды, действующие на живые организмы, называют *экологическими факторами*, они разделяются на *абиотические* (свет, температура, влажность воздуха, состав воды и др.), *биотические* (биоценоз почвы, реки, озёра, моря, океаны и др.) и *антропологические* (результаты добычи нефти, угля, воды и др.).

Для описания зависимости количества особей популяций N в зависимости от времени t в монографии [1] используется уравнение Ю. Одум [2]:

$$N(t) = \frac{K}{1 - \exp(a - r \cdot t)}, \quad (1)$$

(соотношение (1), стр. 15, [1]),

где K – предельное значение количества особей; r – постоянный коэффициент, определяющий норму и соответствующий естественному приросту количества особей популяций ($r = a \cdot K$).

Для характеристики «*коэффициента сопротивляемости среды*» в монографии [1] рекомендуется использовать соотношение:

$$R_m = 1 - \frac{K - N}{K} \quad (2)$$

(соотношение (2), стр. 15, [1]).

Теоретические кривые роста численности особей популяций при наличии и отсутствии ограничивающих факторов показаны на рисунке 1 (рис. 2, стр. 16, [1]).

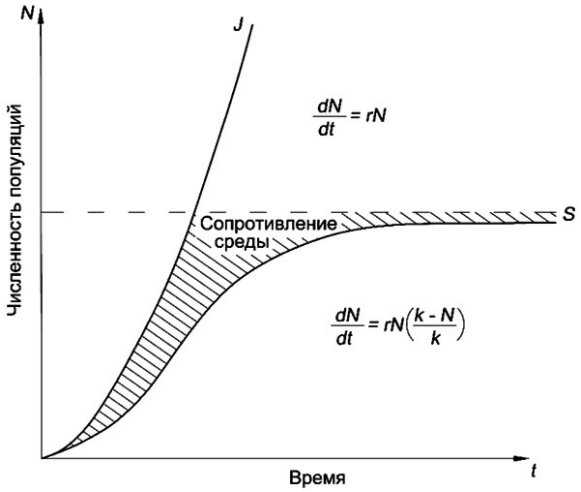

Рисунок 1 – Теоретические кривые роста численности популяций при наличии и отсутствии ограничивающих факторов

В монографии [2] впервые определены основные общие положения построения математических моделей для экологических систем; отмечается, что математические символы представляют удобный способ сжатого описания сложных экологических систем, а уравнения позволяют формально определить возможный способ взаимодействия разных *компонентов экосистемы; математическая цифровая модель представляет собой приближённое и абстрактное отображение реального мира*; отмечается, что модели, построенные на основе анализа экспериментальных компонентов, как правило, *являются наиболее точными и реалистичными*.

В монографии [2] отмечается, например, что в общем случае на планете Земля хлорофилл содержащие растения производят углеводы, белки, жиры и другие сложные вещества; процесс *фотосинтеза* включает *окислительно-восстановительные реакции*, приближённо определяемые уравнениями:

$$CO_2 + 2H_2O \xrightarrow{свет} (CH_2O) + H_2O + 2A,$$

окисление при этом определяется уравнением:

$$2H_2O \rightarrow 4H + 2A,$$

восстановление при этом определяется уравнением:

$$4H + CO_2 \rightarrow (CH_2O) + H_2O,$$

где А – количество кислорода.

(уравнения на стр. 37, [2]).

Если среда *не оказывает* ограничивающего влияния, то скорость роста популяции на особь отражается обыкновенным *линейным дифференциальным уравнением* первого порядка:

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N, \quad (3)$$

(уравнение (1), стр. 232, [2]),

где r – постоянный коэффициент, определяющий мгновенную скорость роста популяций; $N(t)$ – количество популяции в момент времени t.

Максимальное значение коэффициента $r = r_{max}$ называют *биотическим* или *репродуктивным потенциалом*.

Если среда *оказывает* ограничивающее влияние, то скорость роста популяции на особь отражается обыкновенным нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка:

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N \cdot \left(\frac{K - N}{K} \right) \quad (4)$$

(уравнение без номера, стр. 236, [2]),

где K – постоянный коэффициент, определяющий *предел роста популяции*.

Справедливость последнего уравнения с монографии Ю. Одум [2] определена на основе опытных данных роста дрожжевых грибков в питательном растворе из опытов Pearl (1927 год) (табл. 26, стр. 240, [2]), таблица 1.

Таблица 1 – Рост дрожжей в питательной среде

Время, ч	Фактическая биомасса дрожжей[1]	Биомасса, вычисленная по логистическому уравнению[2]	Биомасса, вычисленная по экспоненциальному уравнению[3] (цифры округлены)	Время, ч	Фактическая биомасса дрожжей[1]	Биомасса, вычисленная по логистическому уравнению[2]	Биомасса, вычисленная по экспоненциальному уравнению[3] (цифры округлены)
0	9,6	9,9	9,6	10	513,3	506,9	2042
1	18,3	16,8	17	11	559,7	562,3	3504
2	29,0	28,2	28	12	594,8	600,8	5904
3	47,2	46,7	48	13	629,4	625,8	
4	71,1	76,0	82	14	640,8	641,5	
5	119,1	120,1	139	15	651,1	651,0	
6	174,6	181,9	238	16	655,9	656,7	
7	257,3	260,3	408	17	659,6	660,7	
8	350,7	348,2	694	18	661,8	662,1	14765
9	441,0	433,9	1238				

1. Данные Карлсона (по Пирлу, 1927);
2. $N = \frac{665}{1 + e^{4,1896 - 0,5355 \cdot t}}$;
3. $N_t = N_0 \cdot e^{0,5355t} \ (N_0 = 9,6)$

На рисунке 2 показаны кривые роста дрожжей в питательной среде (рис. 83, стр. 241, [2]).

Отметим, что если среда не оказывает ограничивающего влияния на рост популяций, то зависимость количества особей во времени (*t*) описывается уравнением:

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(r \cdot t) \tag{5}$$

(соотношение (2), стр. 232, [2]).

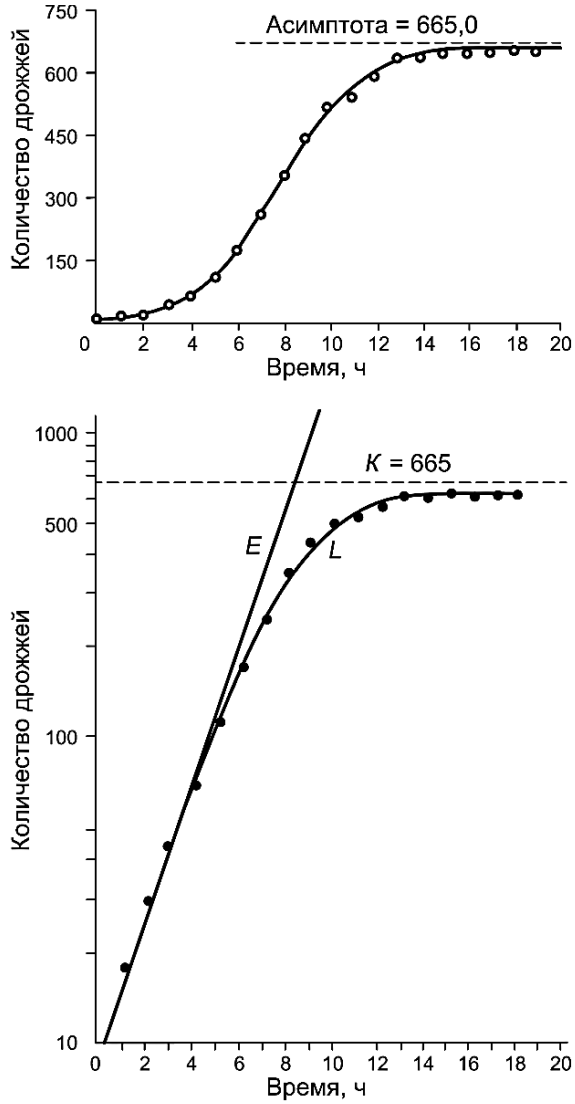

Рисунок 2 – Рост дрожжей в культуре:
Тип роста, описываемый простой S-образной кривой.
Сопротивление среды (в данном случае вредные факторы, обусловленные жизнедеятельностью самих организмов) линейно зависит от плотности.
Кружки – наблюдаемые величины роста; сплошные линии – кривые, построенные по уравнениям.
Вверху – рост дрожжей, представленный в линейном масштабе; точки ложатся на логистическую кривую.
Внизу – те же данные L, представленные в полулогарифмическом масштабе; приведена также экспоненциальная кривая E, показывающая, каким был бы рост при отсутствии самоограничивающих влияний.
Соответствующие данные и уравнения см. в таблице 26
(по Пирлу, 1927; верхний рисунок – из работы Олли и др., 1949)

В случае если среда оказывает ограничивающее действие на рост популяций, то зависимость количества особей во времени *t* отражается уравнением:

$$N(t) = \frac{K}{1 - \exp(a - r \cdot t)} \tag{6}$$

(соотношение без номера на стр. 238, [2]).

Указанные уравнения нуждаются в уточнении потому, что в «*начальное время*» ($t = t_0$) число (количество) дрожжей не может быть равно нулю ($N \neq 0$), как это показано на рисунках 1 и 2, есте-

ственно нуждаются в уточнении основные дифференциальные уравнения, определяющие «*абсолютную скорость роста числа особей*»; вид кривой роста количества особей может характеризоваться разными значениями коэффициента r и зависит от структуры популяции.

Общие вопросы экологии подробно отражены в монографиях [2, 5, 6, 9–11], а основы охраны природы в работах [6, 7], частные вопросы очистки вод отражены в книге [4], вопросы миграции загрязняющих веществ в почвах описаны в монографии [8], общие вопросы гидро- и геохимии отражены в работах [11, 12]; применительно к условиям деятельности по добыче газа конкретные вопросы экологии изучены в монографии [13].

В монографии [9] особенно подробно изучены факторы деградации биосферы, их природа и значение; в книге [13] отмечается, что «*жестокое заблуждение промышленной цивилизации заключается в непонимании многообразия различных связей, благодаря которым энергия проникает в сложную систему индустриального общества и … косвенно питает все части этой системы*».

Большую ошибку допустил человек, считая, что эффективность земледелия увеличилась благодаря новым знаниям в области использования солнечной энергии …

Всё это иллюзия, поскольку человек ест теперь картофель, полученный не только в процессе фотосинтеза, но также вследствие использования нефти …» ([9], стр. 122).

Для описания демоэкологических факторов в монографии Ф. Рамад [9] используется *показатель естественного прироста особей популяции R*:

$$R = \frac{\Delta N}{N \cdot \Delta t}, \tag{7}$$

(соотношение (2.1), стр. 135, [9])

где N – количество особей популяции в момент времени t; N_0 – количество особей популяции в момент времени t_0;

$$\Delta N = N - N_0; \tag{8}$$

$$\Delta t = t - t_0. \tag{9}$$

Для общего количества особей популяций (N) справедливы соотношения:

$$N = N_0 \cdot \exp\left(r \cdot t\right); \tag{10}$$

$$r = \lg\left(1 + R\right), \tag{11}$$

когда «*отсутствуют ограничивающие факторы*», то справедливо дифференциальное уравнение:

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N \tag{12}$$

или

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N_0 \cdot e^{r \cdot t} \tag{13}$$

решение которого определяет «*кривую биотического потенциала*».

Если среда оказывает сопротивление росту особей популяции, то для общего количества особей популяций N в зависимости от времени t предлагается использовать зависимость:

$$N = \frac{K}{1 - \exp\left(a - r \cdot t\right)}, \tag{14}$$

(соотношение (2.8), стр. 138, [9])

где K – *удельная биотическая нагруженность среды* (рис. 1); $r = a \cdot K$ – постоянная роста количества особей.

Для скорости роста количества особей «*при наличии ограничивающих факторов*» справедливо уравнение:

$$\frac{dN}{dt} = r \cdot N \cdot \left(\frac{K - N}{K}\right). \tag{15}$$

(соотношение (2.10), стр. 139, [9]).

Для количественной оценки *коэффициента сопротивления среды* R_m предлагается использовать формулу:

$$R_m = 1 - \frac{K - N}{K}, \tag{16}$$

(соотношение (2.9), стр. 138, [9]),
которое можно записать в виде:

$$R_m = \frac{N}{K}, \tag{17}$$

где N – частное решение дифференциального уравнения (15).

Можно отметить, что справедливость уравнения (15) в монографиях [2, 9] определена по результатам роста дрожжевых грибков в питательном растворе из опытов Pearl (1925 год) (табл. 2.7, стр. 138, [9]; рис. 2.9, стр. 139, [9]).

Установленные при этом математические модели нуждаются в уточнении и развитии, т.к. не учитывают основные положения и особенности процессов охраны окружающей среды [1, 13], охраны природы [6, 7] нефтегазовой промышленности.

Опыты и результаты

Чтобы установить цифровую модель для оценки экологических факторов охраны окружающей среды, воспользуемся результатами опытов, описанных в монографии [1].

При изучении процесса утилизации отработанных буровых растворов и шлама отмечается высокий мелиорирующий эффект применения *фосфогипса-дегидрата* [3]. Авторы изобретения [3] отмечают, что, с целью повышения мелиоративной эффективности солонцовых почв можно использовать состав, который содержит 50–80 масс.% *фосфогипса* и 20–50 масс.% слабоминерализованного отработанного глинистого бурового раствора, в котором гуматы в мелиоранте находятся в устойчивой кальциевой форме; все мелиоранты вносят единовременно под основную обработку почвы глубиной 25–30 см.

Для вымывания из пахотного слоя продуктов обмена, образующийся при взаимодействии мелиоранта с поглощающим комплексом почвы и создания наиболее благоприятного питательного режима для роста и развития сельхозкультур, проводят орошение поливной нормой 300–400 м^3/га; применение смеси возможно и в богарных условиях.

Дозу фосфогипса определяют по содержанию в нем гипса и рассчитывают методом дополнительного насыщения по известной формуле:

$$Д = A \cdot 0{,}086 \cdot H \cdot d,$$

где Д – доза гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), г; A – количество кальция, поглощающегося почвой, мг-экв. на 100 г почвы; H – мощность мелиорируемого слоя, см; d – объёмная масса мелиорируемого слоя.

$Д$ = 9,46 тонн/га ≈ 9,5 тонн/га.

Учитывая, что в фосфогипсе содержится 70–75 % гипса, дозу фосфогипса доводят до 12 тонн/га.

Дозу фосфогипса в смеси с пиритными огарками и со слабоминерализованным отработанным глинистым буровым раствором (ОБР) рассчитывают по коэффициенту эквивалентности к чистому гипсу.

Фосфогипс представляет собой мелкокристаллический порошок, обладающий свойствами тиксотропности во влажном состоянии. Слабо сыпучий фосфогипс имеет следующий химический состав, масс.%:

гипс	70–75
фосфорные соединения (в пересчёте на P_2O_5)	2–3
соединения железа и алюминия	2,5–3,0
глина	5–6
вода	15–20

ОБР представляет собой высококонцентрированную глинистую суспензию и имеет следующий химический состав, масс.%:

глина	10–50
утяжелитель (барит $BaSO_4$)	7–30
гуматы (кальция)	3,0–5,0
органические вещества (преимущественно КМЦ, ССБ, метас, оксил)	1,5–3,0
минеральные соли (преимущественно кальция и калия)	0,2–2,0
вода	40–50

Обработанную мелиорантом почву засевают яровым ячменем, который является стандартным индикаторным растением.

Влияние мелиорантов на агрохимические свойства солонцовых почв и урожайность ячменя определяют после вегетации.

Содержание компонентов ОБР в различных составах дано в таблице 2.

Таблица 2 – Состав отработанного бурового раствора

Компоненты ОБР	Содержание компонентов ОБР, масс. %, в составе		
	1	2	3
Глина	50	30	10
Утяжелитель	7	20	30
Гуматы	3	4	5
Органические вещества	1,5	2,2	3
Минеральные соли	0.2	1	2
Вода	40	45	50

Зависимость агрохимических свойств солонцовой почвы от состава мелиоранта приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Состав мелиоранта

Варианты опыта и вводимый химический мелиорант	Состав ОБР	Доза мелиоранта (в пересчёте на т/га)	Содержание гумуса, %	pH почвы после внесения мелиоранта	Содержание водорастворимого кальция в почвенном поглощающем комплексе, мг-экв./100 г почвы	Содержание фосфора в почве (в пересчёте на P_2O_5), мг/100 г почвы	Содержание калия в почве (в пересчёте на K_2O), мг/100 г почвы	Содержание азота (общего), %
Почва (контроль)	–	–	3,1	8,8	0,39	1,83	18,8	0,14
Фосфогипс	–	12	3,1	7,9	14,25	23,81	18,8	0,14
Фосфогипс (55 %) + пиритные огарки (45 %) (известный	–	16	3,1	7,9	14,42	16,61	17,7	0,14
Фосфогипс (50 %) + ОБР (50 %)	1	12	5,3	7,1	15,78	20,42	38,1	0,34
	2	12	5,3	7,1	15,90	20,37	38,4	0,34
	3	12	5,4	7,2	16,03	20,41	38,7	0,36
Фосфогипс (65 %) + ОБР (35 %)	1	12	4,8	6,8	16,01	20,71	34,0	0,29
	2	12	4,8	6,9	16,11	20,62	34,2	0,30
	3	12	4,9	7,0	16,20	20,69	34,6	0,31
Фосфогипс (80 %) + ОБР (20 %)		12	4,1	6,7	14,64	21,21	29,3	0,19
	2	12	4,1	6,7	14,60	21,32	29,8	0,20
	3	12	4,2	6,8	14,88	21,01	30,1	0,20

Зависимость урожая ячменя от состава мелиоранта приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Зависимость урожая ячменя от состава мелиоранта

Варианты опыта	Состав ОБР	Доза мелиоранта, тонн/га	Урожай ярового ячменя, ц/га	Прибавка урожая	
				ц/га	%
Почва (контроль)	–	–	15,3	–	–
Фосфогипс	–	12,0	17,4	2,1	13,7
Фосфогипс (45 %) + пиритные огарки (55 %) (известный)	–	6,0	20,0	4,7	30,7
		8,0			
Фосфогипс (50 %) + ОБР (50 %)	1	6,0	26,8	11,5	75,1
	2	6,0	26,8	11,5	75,1
Фосфогипс (65 %) + ОБР (35 %)	1	7,8	27,7	12,4	81,0
	2	–	27,7	12,4	81,0
	3	4,2	27,9	12,6	82,4
Фосфогипс (80 %) + ОБР (20 %)	1	9,6	26,1	10,8	70,6
	2	–	26,2	20,9	71,3
	3	2,4	26,2	10,9	71,3

Из данных таблиц 2–4 следует, что внесение смеси фосфогипса с ОБР в солонцовую почву способствует уменьшению pH почвы и обогащению её ценными питательными компонентами в виде калия и гуматов кальция; гуматы, приносимые предлагаемым мелиорантом, находятся в устойчивой кальциевой форме и в отличие от преимущественно натриевых гуматов, содержащихся в почвенной среде, что способствует закреплению органического вещества в почве и улучшению почвенной структуры и пищевого режима. Под действием глинистого коллоидного комплекса ОБР и содержащихся в нем минеральных солей в присутствии фосфогипса происходит оструктуривание солонцовых почв и повышение содержания в них таких ценных питательных элементов, как фосфор и калий. Всё это способствует улучшению агрохимических свойств почвы и, как следствие, повышению урожайности сельхозкультур [3].

В монографии [1] отмечается эффективность очистки буровых сточных вод (БСВ) *методом реагентной коагуляции*; коагулянты представляют собой *соли слабых оснований и сильных кислот* (сульфат алюминия, хлорной железо и т.д.), скорость гидролиза, как правило, пропорциональна концентрации катионов коагулянта.

На рисунке 3, в частности, показаны кривые изменения взвесей (αВВ, %) в зависимости от доз разных коагулянтов (ДК, мг/л).

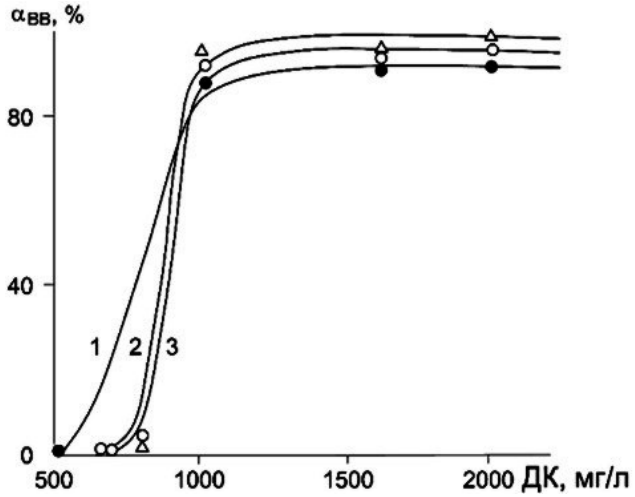

Рисунок 3 – График влияния доз коагулянтов (ДК) на степень очистки БСВ по взвешенным веществам (αВВ, %) для коагулянтов:
1 – $Al_2(SO_4)3$; 2 – $Fe_2(SO4)_3$; 3 – $FeCl_3$
(рис. 18, стр. 205, [1])

На рисунке 4 показаны кривые изменения взвешенных частиц органики (αХПК, %) в зависимости от доз разных коагулянтов (ДК, мг/л).

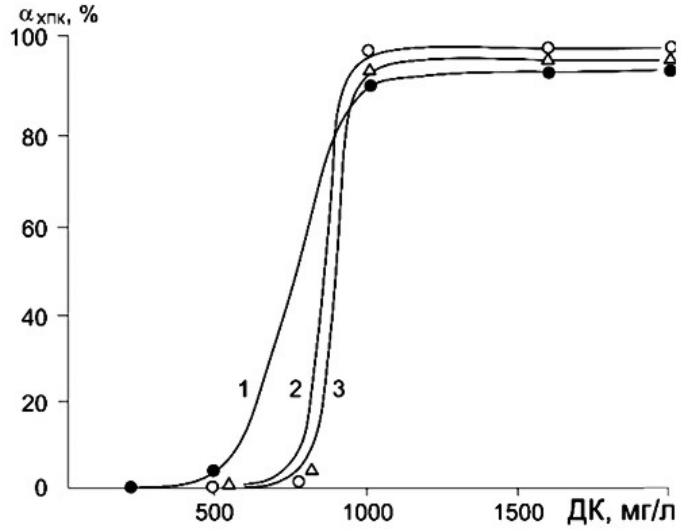

Рисунок 4 – График влияния доз коагулянтов (ДК) на степень очистки БСВ по ХПК (αХПК, %) для коагулянтов:
1 – $Al_2(SO_4)_3$; 2 – $Fe_2(SO4)_3$; 3 – $FeCl_3$
(рис. 19, стр. 205, [1])

На рисунке 5 показаны кривые изменения объёма осадка ($V_{ОС}$, %) в зависимости от доз разных коагулянтов (ДК, мг/л) через два часа отстаивания; время полного осаждения взвесей БСВ составляет 30–60 мин.

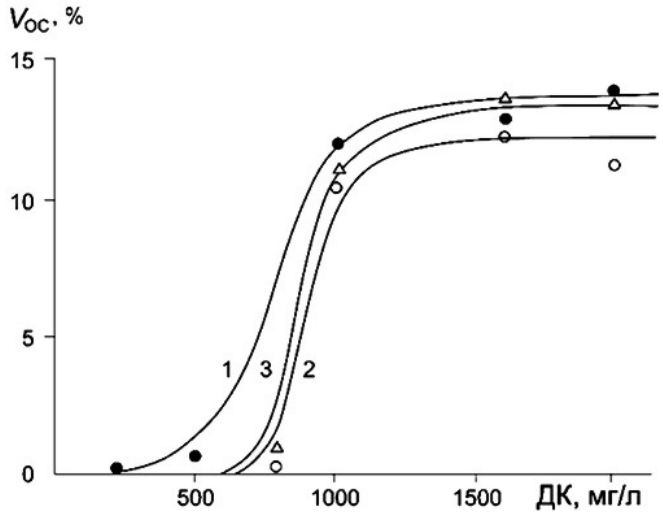

Рисунок 5 – Графики влияния на объём осадка ($V_{ОС}$) через 2 часа отстаивания для разных доз коагулянтов:
1 – $Al_2(SO_4)_3$; 2 – $Fe_2(SO_4)_3$; 3 – $FeCl_3$
(рис. 20, стр. 206, [1])

Рассматривая методы и технологии обезвреживания отработанных буровых растворов и шлама, авторы монографии [1] отмечают эффективность *способа отмывки* ОБР от нефти и нефтепродуктов *горячей технической водой* системы оборотного водоснабжения буровой; на рисунке 6 приведены результаты опытных данных при отмывке нефти от шлама при постоянной температуре воды (40 °С; 60 °С; 80 °С; 100 °С) при содержании нефти в шламе 7,5 % и общей влажности массы 15 %.

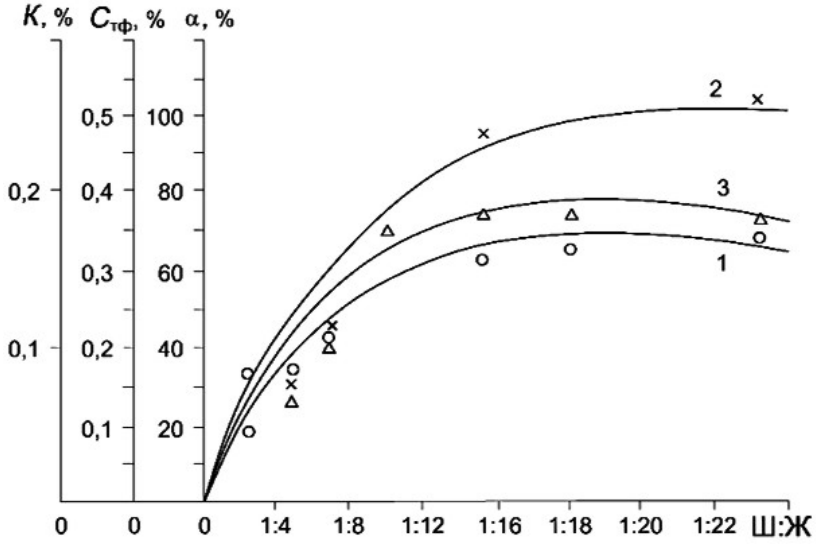

Рисунок 6 – График зависимости степени отмывки шлама α (1), загрязнённости сточной воды $С_{тф}$ (2) и содержания коллоидной фракции К (3) от соотношения шлама (Ш) и жидкости отмыва (Ж) (рис. 59, стр. 314, [1])

На рисунке 7 показаны кривые изменения вымываемости отверждающих композиций на основе органических материалов (ХПК).

На рисунке 8 показаны кривые кинетики процесса твердения ОБР, обработанного цементом при разных дозах.

В патенте № 2138451 РФ для очистки объектов окружающей среды от нефти и нефтепродуктов предложено использовать биопрепарат, который включает *аэробные нефтеокисляющие бактерии*, минеральные добавки и наполнитель [14].

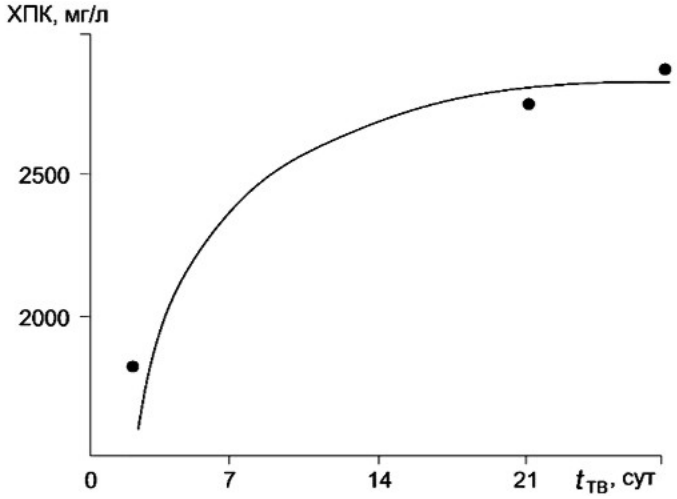

Рисунок 7 – Динамика вымываемости органики (ХПК) из отверждённого ОБР
(рис. 65, стр. 322, [1])

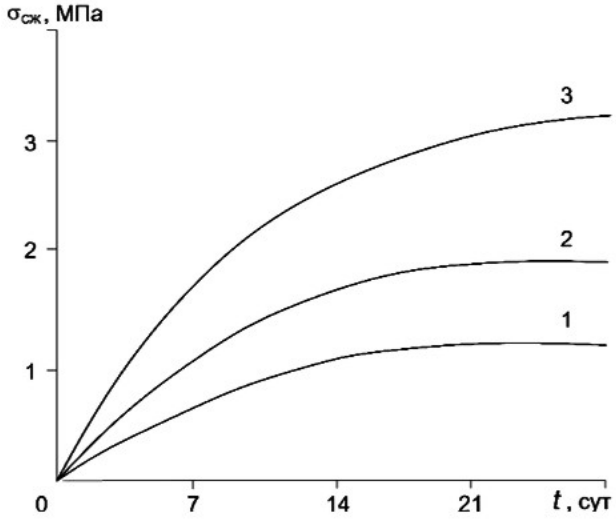

Рисунок 8 – Кинетика процесса твердения ОБР, обработанного цементом
(% к массе ОБР): 1 – 20 %; 2 – 40 %; 3 – 60 %
(рис. 64, стр. 321, [1])

В качестве аэробных нефтеокисляющих бактерий содержится консорциум мезофильных бактериальных штаммов Pseudomonas putida ПИ $К_о$-1, Pseudomonas fluorescens ПИ-896, Micrococcus species ПИ $К_у$-1 и консорциум психрофильных бактериальных штаммов Pseudomonas fluorescens ПИ ЛБХ-3, Pseudomonas putida ПИ ЛБХ-3, Xanthomonas species ПИ ЛБХ-7, при следующем соотношении компонентов, масс.%: Pseudomonas putida ПИ $К_о$-1 1-10, Pseudomonas fluorescens ПИ-896 1-10, Micrococcus species ПИ $К_у$-1 1-10, Pseudomonas fluorescens ПИ ЛБХ-3 1-10, Pseudomonas putida ПИ ЛБХ-8 1–10, Xanthomonas species ПИ ЛБХ-7 1-10, минеральные добавки: источник азота 0,25–0,75, источник фосфора 0,15–0,50, источник калия 0,10–0,25, наполнитель – остальное. Препарат эффективен в широком диапазоне температур и pH среды.

Изобретение относится к средствам борьбы с загрязнениями объектов окружающей среды нефтью и нефтепродуктами при помощи микроорганизмов и может быть использовано, например, *при ликвидации последствий нефтяных разливов.*

Известен биопрепарат для очистки объектов окружающей среды от нефти и нефтепродуктов, содержащий аэробные нефтеокисляющие бактерии Acenitobacter oleovorum, остатки питательных сред, стабилизирующие добавки, минеральные соли и различные наполнители (см. «Препарат бактериальный *Биоприн-Б*», технические условия ТУ 11249895-12-22-92).

Недостатком этого препарата является необходимость наличия стабилизирующих добавок для поддержания жизнедеятельности микроорганизмов. Кроме того, бактерии Acenitobacter oleovorum недостаточно активно утилизируют тяжелые фракции нефти.

Известен также биопрепарат для очистки объектов окружающей среды, преимущественно почвы и воды, включающий нефтеокисляющие бактерии, например, Mycobacterium, углеводородные добавки – нормальные парафины – C_{12}-C_{18}, минеральные добавки – щавелевокислый аммоний и воду в качестве наполнителя (см., например, патент № 2053206 РФ от 29.09.1994 г.).

Данный биопрепарат принят в качестве прототипа настоящего изобретения.

Его недостатком является узкий диапазон температуры, при которой происходит активное окисление углеводородов нефти.

Биопрепарат имеет достаточную активность только при T = 20–40 °С, что сужает возможность его применения в условиях северных регионов.

В основу настоящего изобретения положено решение задачи создания биопрепарата для очистки объектов окружающей среды от нефти и нефтепродуктов, имеющего более широкий диапазон температуры, при которой происходит их активное окисление.

Согласно изобретению эта задача решается за счёт того, что в биопрепарате для очистки от нефти и нефтепродуктов, включающем *аэробные нефтеокисляющие бактерии, минеральные добавки и наполнитель*, в качестве аэробных нефтеокисляющих бактерий содержится консорциум мезофильных бактериальных штаммов Pseudomonas putida ПИ Ко-1, Pseudomonas fluorescens ПИ-896, Micrococcus species ПИ Ку-1 и консорциум психрофильных бактериальных штаммов Pseudomonas fluorescens ПИ ЛБХ-3, Pseudomonas putida ПИ ЛБХ-8, Xantho-monas species ПИ ЛБХ-7 при следующем соотношении компонентов, масс. %:

Pseudomonas putida ПИ Ко-1 – 1-10;
Pseudomonas fluorescens ПИ-896 – 1-10;
Micrococcus species ПИ Ку-1 – 1-10;
Pseudomonas fluorescens ПИ ЛБХ-3 – 1-10;
Pseudomonas putida ПИ ЛБХ-8 – 1-10;
Xanthomonas species ПИ ЛБХ-7 – 1-10.
Минеральные добавки:
источник азота – 0,25–0,75;
источник фосфора – 0,15–0,50;
источник калия – 0,10–0,25;
наполнитель – остальное.

Чистые культуры микроорганизмов выделены из почв, загрязненных нефтепродуктами, на селективных питательных средах, содержащих в качестве единственного источника углеродного питания углеводороды нефтепродуктов.

Штаммы зарегистрированы в коллекции микроорганизмов Всероссийского института защиты растений КМЗР ВИЗР-760. Штаммы хранятся отдельно на агаризованной питательной среде (МПА или СПА) при температуре + 0 ÷ +5 °С или в лиофилизированном состоянии в ампулах.

В первом конкретном примере биопрепарат содержит бактериальные штаммы: Pseudomonas putida ПИ Ко-1 – 7 масс.%, Pseudomonas fluorescens ПИ-896 – 7 масс.%, Micrococcus species ПИ $К_у$-1 – 7 масс.%, Pseudomonas fluorescens ПИ ЛБХ-3 – 7 масс.%., Pseudomonas putida ПИ ЛБХ-8 – 7 мас.%, Xanthomonas species ПИ ЛБХ-7 – 5 масс.%.

Штамм Pseudomonas putida ПИ $К_о$-1 – мелкие короткие прямые подвижные одиночные палочки, имеют полярные жгутики, размеры: (0,2–0,3) × (0,5–0,8) мкм; грам (–); аэроб. Колонии штамма круглые, гладкие, с блестящей поверхностью, слегка приподнятые в центре, желтоватые, полупрозрачные, диаметром 4–6 мм. Штамм усваивает аммонийный и нитратный азот, каталазоположителен, образует флюоресцирующие пигменты, аргениндигидролазу, не разжижает желатину, не гидролизует крахмал, оксидазная реакция положительна. Использует в качестве источников роста глюкозу, 2-кетоглюконат, L-валин, β-аланин, DL-аргинин, углеводороды.

Штамм Pseudomonas fluorescens ПИ-896 – мелкие короткие одиночные палочки, имеют полярные жгутики, размеры: (0,1–0,4) × (0,6–0,7) мкм; грам (–), аэроб. Колонии штамма круглые, гладкие, с блестящей поверхностью, слабовыпуклые, полупрозрачные, бесцветные, диаметром 3–5 мм. Штамм усваивает аммонийный и нитратный азот, каталазоположителен, образует флюоресцирующие пигменты, оксидазная реакция положительна, гидролизует желатину, не гидролизует крахмал, образует аргининдигролазу. Использует в качестве источников роста глюкозу, трегалозу, 2-кетоглюконат, мезоинозит, углеводороды, L-арабинозу, сахарозу, этиловый спирт.

Штамм Micrococcus species ПИ $К_у$-1 – кокки, сферические неподвижные клетки, диаметром 0,6–1,0 мкм; образуют неправильные группы или встречаются поодиночке. Колонии штамма круглые с ровным краем, тёплого цвета, непрозрачные, гладкие, блестящие, диаметром 2–5 мм. Штамм усваивает аммонийный и нитратный азот, каталазоположителен, образует жёлтый пигмент, не гидролизует крахмал, не образует индол, образует гидролазы. Использует в качестве источников роста глюкозу, L-валин, β-аланин, углеводороды.

Штамм Pseudomonas fluorescens ПИ ЛБХ-3 – мелкие короткие одиночные палочки, имеют полярные жгутики, размеры: (0,25–0,35) × (0,55–0,65) мкм; грам (–), аэроб. Колонии штамма круглые,

гладкие, с блестящей поверхностью, слабовыпуклые, полупрозрачные, бесцветные, диаметром 4–6 мм. Штамм усваивает аммонийный и нитратный азот, каталазоположителен, образует флюоресцирующие пигменты, оксидазная реакция положительна, гидролизует желатину, не гидролизует крахмал, образует аргининдигролазу. Использует в качестве источников роста глюкозу, трегалозу, 2-кетоглюконат, мезоинозит, углеводороды, L-арабинозу, сахарозу, этиловый спирт.

Штамм Pseudomonas putida ПИ ЛБХ-8 – мелкие короткие прямые подвижные одиночные палочки, имеют полярные жгутики, размеры: (0,15–0,25) × (0,45–0,75) мкм; грам (–); аэроб. Колонии штамма круглые, гладкие, с блестящей поверхностью, слегка приподнятые в центре, желтоватые, полупрозрачные, диаметром 5-7 мм. Штамм усваивает аммонийный и нитратный азот, каталазоположителен, образует флюоресцирующие пигменты, аргениндигидролазу, не разжижает желатину, не гидролизует крахмал, оксидазная реакция положительна. Использует в качестве источников роста глюкозу, 2-кетоглюконат, L-валин, β-аланин, DL-аргинин, углеводороды.

Штамм Xanthomonas species ПИ ЛБХ-7 – одиночные прямые палочки, размеры: (0,20–0,25) × (0,6–1,0) мкм; колонии штамма круглые, гладкие, с блестящей поверхностью, слизистой консистенции, светло-жёлтого цвета, диаметром 3–5 мм. Имеются полярные жгутики, не образуют чехлов, грам (–). Оксидазы не образует, каталазу образует. В слабо забуференной среде образуется в небольших количествах кислота. Использует различные углеводы, но не инулин, рамнозу, адонит, дульцит, салицин, инозит. В молоке с бромкрезоловым пурпурным индикатором кислота не образуется. Использует ацетат, пропионат, цитрат, малат, сукцинат. Бензоат и оксалат не использует. Гидролизует крахмал и TWEEN-80, нитраты не восстанавливает. Образует сероводород из цистина, тиосульфата, пептона. Ацетоин и индол не образует. Нуждается в метионине, глутаминовой кислоте, никотиновой кислоте. Аспарагин не использует. Строгий аэроб. Растёт при температуре от +5 до +30 °С. Желатину разжижает. Толерантен к NaCl – 0,5–1,5 %. Уреазу не образует.

Для получения посевного материала штаммы выращивали раздельно, в ферментере вели совместное культивирование микроорганизмов.

Для выращивания указанных микроорганизмов использована питательная среда следующего состава:

KH_2PO_4 – 2 г/л;
Na_2HPO_4 – 3 г/л;
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,5 г/л;
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$ – 0,05 г/л;
$CaCl_2 \cdot 2H2O$ – 0,01 г/л;
$(NH4)_2SO_4$ – 2 г/л;
соевая мука – 5 г/л;
меласса – 20 г/л;
вода – до 1 л.

Процесс культивирования проводился в ферментерах при T = 20 °С, pH 6,8-7,2 в течение 24 часов в аэробных условиях.

В качестве индуктора использована 0,01 % сырая нефть.

В качестве минеральных добавок в первом примере использованы:
источник азота – карбамид – 0,6 масс.%;
источник фосфора – суперфосфат двойной – 0,30 масс.%;
источник калия – калий сернокислый для сельского хозяйства – 1,5 масс.%.

Наполнителем служит стерильный торф. После внесения ассоциаций микроорганизмов в торф проводилось доращивание культур при T = 3 °С, в течение 120 часов.

Титр биопрепарата $1 \cdot 10^{12}$ жизнеспособных клеток в 1 г препарата.

Препарат при испытаниях внесён в керамические сосуды, наполненные почвой с различным pH (в пределах от 4,5 до 8,2) и содержанием мазута 11,2–12,6 г/кг. Количество внесенного препарата – 1 г на 1 кг почвы. Сосуды выдерживались в термостатах в диапазоне температур от 3 °С до 40 °С в течение 90 сут. Содержание мазута в почве контролировалось 1 раз в 30 дней, опыт проведён в трёх повторностях. Результаты испытаний биопрепарата приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Динамика снижения содержания мазута в зависимости от pH и температуры почвы

T, °C / pH	Содержание мазута в почве, г/кг								Эффективность деструкции мазута через 90 дней, %	
	начальное		через 30 дней		через 60 дней		через 90 дней			
	3°	40°	3°	40°	3°	40°	3°	40°	3°	40°
4,5	12,3	12,6	9,0	9,3	4,6	4,2	3,9	3,3	68,0	72,6
6,8	11,7	11,3	5,4	5,7	4,0	3,4	1,9	1,3	85,4	88,7
8,2	11,2	11,3	7,6	7,0	3,9	3,3	2,9	2,5	75,4	79,4

В другом примере биопрепарат содержит:
Pseudomonas putida ПИ $К_о$-1 – 6 масс.%;
Pseudomonas fluorescens ПИ-896 – 10 масс.%;
Micrococcus species ПИ Ку-1 – 1 масс.%;
Pseudomonas fluorescens ПИ ЛБХ-3 – 5 масс.%;
Pseudomonas putida ПИ ЛБХ-8 – 8 масс.%;
Xanthomonas species ПИ ЛБХ-7 – 3 масс.%.
Микроорганизмы выращены на той же питательной среде, что и в первом примере.
Минеральные добавки содержат:
источник азота – сульфат аммония – 0,7 масс.%;
источник фосфора – простой суперфосфат – 0,4 масс.%;
источник калия – сульфат калия технический – 0,2 масс.%.
Наполнителем служит стерильный торф. Титр препарата $5 \cdot 10^{11}$ жизнеспособных клеток в 1 г препарата. Почва, подлежащая очистке, содержала сырой нефти 11,5–12,9 г/кг. Опыт проведён в трёх повторностях.
Результаты испытаний приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Динамика снижения содержания сырой нефти в зависимости от pH и температуры почвы

T, °C / pH	Содержание сырой нефти в почве (г/кг)								Эффективность деструкции сырой нефти через 60 дней, %	
	начальное		через 30 дней		через 45 дней		через 60 дней			
	3°	40°	3°	40°	3°	40°	3°	40°	3°	40°
4,5	11,8	12,6	8,4	7,6	4,5	4,4	3,3	2,9	73,2	76,8
6,8	12,1	12,9	7,9	7,2	3,6	3,6	1,1	0,7	91,6	92,9
8,2	11,5	11,7	7,7	7,1	4,2	3,9	2,3	1,9	90,1	84,6

В результате проведённых опытов можно констатировать весьма высокую деструктивную активность заявленного биопрепарата (до 93), в том числе и в отношении тяжёлых фракций нефти. При этом препарат эффективен в широком диапазоне pH и температуры очищаемой среды (pH 4,5–8,2, T = 3–40 °C).

Биопрепарат может быть изготовлен промышленным способом с использованием стандартного биотехнологического оборудования с применением доступных сырьевых компонентов; биопрепарат для очистки объектов окружающей среды от нефти и нефтепродуктов, включающий аэробные нефтеокисляющие бактерии, минеральные добавки и наполнитель, отличающийся тем, что в качестве аэробных нефтеокисляющих бактерий содержит консорциум мезофильных бактериальных штаммов Pseudomonas putida ПИ $К_о$-1, Pseudomonas fluorescens ПИ-896, Micrococcus species ПИ $К_у$-1 и консорциум психрофильных бактериальных штаммов Pseudomonas fluorescens ПИ ЛБХ-3, Pseudomonas putida ПИ ЛБХ-8, Xanthomonas species ПИ ЛБХ-7 при следующем соотношении компонентов, масс.%:
Pseudomonas putida ПИ Ко-1 – 1-10;
Pseudomonas fluorescens ПИ-896 – 1-10;
Micrococcus species ПИ Ку-1 – 1-10;
Pseudomonas fluorescens ПИ ЛБХ-3 – 1-10;
Pseudomonas putida ПИ ЛБХ-8 – 1-10;
Xanthomonas species ПИ ЛБХ-7 – 1-10.
Минеральные добавки:
источник азота – 0,25–0,75;
источник фосфора – 0,15–0,50;
источник калия – 0,10–0,25;
наполнитель – остальное.
Недостатком данного биопрепарата является сложный состав компонентов и, кроме того, для выращивания микроорганизмов используется питательная среда, состоящая из сложных солей калия, натрия магния, железа, кальция, а также соевой муки, меласса и воды; в качестве минеральных добавок используют источники азота, фосфора и калия, количество которых для конкретных почвенно-климатических условий не обосновано (не указано).
Авторы монографии [1] отмечают, что при отверждении отходов бурения сокращаются сроки засыпки шламовых амбаров, значительно *улучшаются условия рекультивации и достигается высокая экологичность ликвидации шламовых амбаров*.
Рассматривая опытные данные разных технологий рекультиваций шламовых амбаров на рисунках 3–8 можно, *во-первых*, отметить их подобие; в общем случае эти кривые представляют S-кривые.

Во-вторых, «начальные» опытные и экспериментальные данные, как правило, не находятся в начальной точке (0; 0); существует некоторое «*начальное значение*» дозы коагулянта, при котором «*начинается процесс рекультивации*».

В-третьих, как правило, все кривые кинетики, или кривые степени очистки имеют некоторое (предельное) асимптотическое значение при больших количествах дозы коагулянта, или больших значениях времени.

Новая цифровая оценка экологических факторов охраны окружающей среды

Принимаем справедливость следующего утверждения: абсолютная скорость роста биоэкологического потенциала *S* возрастает при увеличении количества экологического фактора x и пропорциональны количеству биологического потенциала, не достигшего предельного значения A и возможному значению выше некоторого минимального количества B, поэтому можно записать основное дифференциальное уравнение первого порядка:

$$\frac{dS}{dx} = k \cdot (A - S) \cdot (B + S), \tag{18}$$

где k – коэффициент пропорциональности, определяющий «относительную силу действия экологического фактора» x; B – постоянный коэффициент, равный некоторому минимальному количеству биоэкологического потенциала S и определяемый по экспериментальным (опытным) данным; A – постоянный коэффициент, равный предельному (максимальному) значению биоэкологического потенциала S и определяемому по экспериментальным данным.

Для решения уравнения (18) назначим «*начальные условия*»:

$$S(x_0) = S_0, \tag{19}$$

где x_0 – начальное значение экологического фактора; S_0 – начальное значение биоэкологического потенциала при $x = x_0$.

Решение уравнения (18), удовлетворяющее начальным условиям (19) можно записать в виде:

$$S(x) = \frac{A \cdot (B + S_0) \cdot \exp[k \cdot (A + B) \cdot (x - x_0)] - B \cdot (A - S_0)}{(B + S_0) \cdot \exp[k \cdot (A + B) \cdot (x - x_0)] + (A - S_0)} \tag{20}$$

или в виде:

$$\ln\left|\frac{B + S}{B + S_0}\right| - \ln\left|\frac{A - S}{A - S_0}\right| = k \cdot (A + B) \cdot (x - x_0). \tag{21}$$

Значение относительного коэффициента действия экологического фактора k_i на интервале от $x = x_{i-1}$, где $S(x_{i-1}) = S_{i-1}$ до значения $x = x_i$, где $S(x_i) = S_i$ определяем по формуле:

$$k_i = \frac{\ln[(A - S_{i-1}) \cdot (B + S_i)] - \ln[(B + S_{i-1}) \cdot (A - S_i)]}{(A + B) \cdot (x_i - x_{i-1})}. \tag{22}$$

Значение предельного количества биоэкологического потенциала (A) можно найти по формуле:

$$A + B = \frac{2 \cdot (B + S_1) \cdot (B + S_2) \cdot (B + S_3) - (B + S_2)^2 \cdot (S_1 + S_3 + 2 \cdot B)}{(B + S_1) \cdot (B + S_3) - (B + S_2)^2}, \tag{23}$$

где S_1, S_2, S_3 – экспериментальные значения биоэкологического потенциала S, установленные через равные интервалы изменения экологического фактора (x), т.е.: $x_3 - x_2 = x_2 - x_1$ и соответственно $S_1 = S(x_1)$, $S_2 = S(x_2)$, $S_3 = S(x_3)$.

Пример 1. Рассмотрим опытные данные о росте дрожжевых грибов в питательном растворе из экспериментов Pearl (1927 год), которые использовались в монографии Ю. Одум [3], книге Ф. Рамад [9] и приведены в таблице 1.

Используя значения:

$$B = 9{,}6;\ S_1(9) = 441{,}0;\ S_2(13) = 629{,}4;\ S_3(18) = 661{,}8,$$

по формуле (23) находим значение предельного количества биоэкологического потенциала (опытное предельное значение биомассы A дрожжей):

$$A+B=\frac{2\cdot(9{,}6+441)\cdot(9{,}6+629{,}4)\cdot(9{,}6+661{,}8)-(639)^2\cdot(1122)}{(450{,}6)\cdot(671{,}4)-(639)^2}$$

или

$$A + 9{,}6 = 678{,}05,$$

откуда следует

$$A = 668{,}45;\ B = 9{,}6.$$

По формуле (22) находим значения коэффициентов действия экологических факторов k_i, а по формуле (20) определяем расчётные значения биомассы дрожжей в зависимости от времени t, таблица 7.

Таблица 7 – Опытные $S_{оп}$ и расчётные значения биомассы дрожжей $S_{рс}$ в зависимости от времени

№	t, час	$S_{оп}$	$S_{рс}$	S^*
1	0	9,6	9,6	9,9
2	1	18,3	18,3	16,8
3	2	29,0	30,7	28,2
4	3	47,2	43,5	46,7
5	4	71,1	72,9	76,0
6	5	119,1	103,2	120,1
7	6	174,6	186,3	181,9
8	7	257,3	243,0	260,3
9	8	350,7	350,0	348,2
10	9	441,0	441,0	433,9
11	10	513,3	516,5	506,9
12	11	559,7	567,7	562,3
13	12	594,8	594,2	600,8
14	13	629,4	619,5	625,8
15	14	640,8	648,3	641,5
16	15	651,1	649,9	651,0
17	16	655,9	657,6	656,7
18	17	659,6	659,4	660,7
19	18	661,8	662,2	662,1

Из данных таблицы 7 видно, что расчётные значения биомассы дрожжей $S_{рс}$ в трёх точках совпали с опытными Soп данными; для сравнения в таблице 7 приведены расчётные значения биомассы дрожжей S*, полученные по логистическому уравнению:

$$N(t)=\frac{665}{1+\exp(4{,}1896-0{,}5355\cdot t)},$$

в котором три параметра: K = 665; a = 4,1896; r = – 0,5355 определены методом наименьших квадратов ([2], стр. 240).

Пример 2. Рассмотрим опытные данные применения фосфогипса-дигидрата [1] для мелиорации ОБР по рекомендациям авторов изобретения [3]; из данных таблицы 4 используем значения урожая ярового ячменя (S, ц/га) для соответствующих доз мелиоранта (x, тонн/га):

$$B = S\ (0) = 15{,}3;\ S_1\ (6{,}0) = 26{,}8;\ S_2\ (7{,}8) = 27{,}7;\ S_3\ (9{,}6) = 36{,}2,$$

находим значение предельного количества биоэкологического потенциала (опытное предельное значение урожая (А) ярового ячменя) по приближенной формуле:

$$A = S_k + \frac{1}{2}\cdot(S_k - S_{k-1}),$$

S_k – последнее опытное значение урожая ярового ячменя; S_{k-1} – предпоследнее опытное значение урожая ярового ячменя,

$$A = 36{,}2 + \frac{1}{2}\cdot(36{,}2 - 27{,}7) = 40{,}45\ \text{ц/га}.$$

По формуле (22) находим значения коэффициентов действия экологических факторов k_i, а по формуле (20) определяем расчётные значения урожая ярового ячменя S_i в зависимости от дозы мелиоранта (табл. 8).

Таблица 8 – Опытные $S_{оп}$ и расчётные значения урожая ярового ячменя $S_{рс}$ в зависимости от дозы мелиоранта

№ п.	1	2	3	4
Доза мелиоранта, тонн/га	0	6,0	7,8	9,6
Урожай ярового ячменя (опыт), ц/га	15,3	26,8	27,7	36,2
Урожай ярового ячменя (расчёт), ц/га	15,30	26,80	29,46	28,56

Из данных таблицы 8 видно хорошее соответствие экспериментальных и расчётных значений урожая ярового ячменя.

Пример 3. Рассмотрим опытные данные очистки объектов окружающей среды от нефти и нефтепродуктов с применением аэробных нефтеокисляющих бактерий, минеральных добавок и наполнителей, согласно патенту № 2138454 РФ [14]; из данных таблицы 5 значения *содержания мазута* в почве (M_i, г/кг) и соответствующей длительности при pH = 8,2 и температуре T = 3 °С равны:

$$M\,(0) = 11{,}2;\ M_1\,(30) = 7{,}6;\ M_2\,(60) = 3{,}9;\ M_3\,(90) = 2{,}9,$$

и определим соответствующие *значения массы при отсутствии мазута в почве* по формуле:

$$S_i = 100 - M_i,$$

и, следовательно, находим значения:

$$B = S\,(0) = 88{,}8;\ S_1\,(30) = 92{,}4;\ S_2\,(60) = 96{,}1;\ S_3\,(90) = 97{,}1,$$

По этим значениям найдем с помощью формулы (23) предельное значение общей *деструкции мазута A* за 90 сут. опыта:

$$A + 88{,}8 = \frac{2\cdot(88{,}8+92{,}4)\cdot(88{,}8+96{,}1)\cdot(88{,}8+97{,}1)-(184{,}9)^2\cdot(367{,}1)}{(181{,}2)\cdot(185{,}9)-(184{,}9)^2}$$

или

$$A + 88{,}8 = 186{,}26,$$

откуда следует:

$$A = 97{,}46;\ B = 88{,}8.$$

По формуле (22) находим значения коэффициентов действия экологических факторов *ki*, а по формуле (20) определяем расчётные значения *деструкции мазута* S_i в зависимости от времени t (табл. 9).

Таблица 9 – Опытные и расчётные значения деструкции мазута в зависимости от времени

№ п.	1	2	3	4
Время, сут.	0	30	60	90
Общая деструкция (опыт), %	88,8	92,4	96,1	97,1
Общая деструкция (расчёт), %	88,80	92,40	94,53	97,10

Из данных таблицы 9 видно хорошее соответствие экспериментальных и расчётных значений общей *деструкции мазута* в почве от применения нефтеокисляющих бактерий.

Пример 4. Рассмотрим опытные данные по *содержанию нефти* в почве (M_i, г/кг) и соответствующей длительности опыта при pH = 4,5 и температуре T = 3 °С равны:

$$M\,(0) = 11{,}8;\ M_1\,(30) = 8{,}4;\ M_2\,(45) = 4{,}5;\ M_3\,(60) = 3{,}3,$$

и определим соответствующие *значения массы при отсутствии нефти в почве* по формуле:

$$S_i = 100 - M_i,$$

и, следовательно, находим значения:

$$B = S\,(0) = 88{,}2;\ S_1\,(30) = 91{,}6;\ S_2\,(45) = 95{,}5;\ S_3\,(60) = 96{,}7,$$

По этим значениям найдём с помощью формулы (23) предельное значение общей деструкции нефти A за 60 сут. опыта:

$$A+88{,}2=\frac{2\cdot(88{,}2+91{,}6)\cdot(88{,}2+95{,}5)\cdot(88{,}2+96{,}7)-(183{,}7)^2\cdot(364{,}7)}{(179{,}8)\cdot(184{,}9)-(183{,}7)^2}$$

или

$$A + 88{,}2 = 185{,}42,$$

откуда следует:

$$A = 97{,}21;\ B = 88{,}2.$$

По формуле (22) находим значения коэффициентов действия экологических факторов k_i, а по формуле (20) определяем расчётные значения *деструкции нефти* S_i в зависимости от времени t (табл. 10).

Таблица 10 – Опытные и расчётные значения деструкции нефти в зависимости от времени

№ п.	1	2	3	4
Время, сут.	0	30	45	60
Общая деструкция (опыт), %	88,2	91,6	95,5	96,7
Общая деструкция (расчёт), %	88,20	91,60	92,80	96,70

Из данных таблицы 10 видно хорошее соответствие экспериментальных и расчётных значений общей *деструкции нефти* в почве от применения нефтеокисляющих бактерий.

В качестве основных выводов можно отметить следующие положения.

1. Представлен краткий обзор и анализ существующих технологий утилизации, мелиорации и рекультивации почв, загрязненных нефтью и нефтепродуктами.

2. Предложена новая цифровая методика оценки влияния экологических факторов при охране окружающей среды в нефтегазовой промышленности.

3. Приведены примеры расчётов, показывающие хорошее соответствие опытных и расчётных параметров.

Список литературы:

1. Булатов А.И. Охрана окружающей среды в нефтегазовой промышленности / А.И. Булатов, П.П. Макаренко, В.Ю. Шеметов. – М. : Недра, 1997. – 783 с.

2. Одум Ю. Основы экологии. – М. : Мир, 1975. – 744 с.

3. Состав для химической мелиорации солонцовых почв / В.А. Шишов [и др.] // Авторское Свидетельство СССР № 1288196. Заявка 29.05.1985 г. Опубликовано 07.02.1987 г. Бюллетень № 5.

4. Бабенков В.Д. Очистка воды коагулянтами. – М. : Наука, 1977. – 356 с.

5. Риклефе Р. Основы общей экологии. – М. : Мир, 1978. – 315 с.

6. Будыко М.И. Географические аспекты охраны природы. – М. : География, 1979. – 123 с.

7. Гришина Л.А. Основы охраны природы. – Л. : Гидрометеоиздат, 1980. – 306 с.

8. Солнцева Н.П. Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах / Н.П. Солнцева, Ю.И. Пиковский. – Л. : Гидрометеоиздат, 1980. – 252 с.

9. Рамад Ф. Основы прикладной экологии. – Л. : Гидрометеоиздат, 1981. – 574 с.

10. Фёдоров В.Д. Экология / В.Д. Фёдоров, Т.Г. Гильманов. – М. : Наука, 1984. – 294 с.

11. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. – Л. : Гидрометеоиздат, 1984. – 244 с.

12. Ковалевский В.В. Геохимическая экология. – М. : Наука, 1986. – 291 с.

13. Гриценко А.И. Экология. Нефть и газ / А.И. Гриценко, Г.С. Акопова, В.М. Максимов. – М. : Наука, 1997. – 598 с.

14. Биопрепарат для очистки объектов окружающей среды от нефти и нефтепродуктов / В.М. Саксон, С.А. Кузнецов, А.В. Кретов [и др.] // Патент РФ № 2138451. Заявка: 97120732/13 от 05.12.1997 г. Опубликовано: 27.09.1999 г.

List of references:

1. Bulatov A.I. Environmental Protection in the Oil and Gas Industry / A.I. Bulatov, P.P. Makarenko, V.Y. Shemetov. – M. : Nedra, 1997. – 783 p.

2. Odum Yu. Fundamentals of Ecology. – M. : Mir, 1975. – 744 p.

3. Composition for chemical melioration of solonetzic soils / V.A. Shishov [et al.] // USSR Author's Certificate № 1288196. Application 05/29/1985. Published 02/07/1987. Bulletin № 5.

4. Babenkov V.D. Water Purification with Coagulants. – M. : Nauka, 1977. – 356 p.
5. Ricklefe R. Fundamentals of General Ecology. – M. : Mir, 1978. – 315 p.
6. Budyko M.I. Geographical aspects of nature conservation. – M. : Geography, 1979. – 123 p.
7. Grishina L.A. Fundamentals of nature conservation. – L. : Gidrometeoizdat, 1980. – 306 p.
8. Solntseva N.P. Migration of pollutants in soils and adjacent environments / N.P. Solntseva, Yu.I. Pikovsky. – L. : Gidrometeoizdat, 1980. – 252 p.
9. Ramad F. Fundamentals of applied ecology. – L. : Gidrometeoizdat, 1981. – 574 p.
10. Fedorov V.D. Ecology / V.D. Fedorov, T.G. Gil'manov. – M. : Nauka, 1984. – 294 p.
11. Izrael Yu.A. Ecology and control of the state of the natural environment. – L. : Gidrometeoizdat, 1984. – 244 p.
12. Kovalevsky V.V. Geochemical ecology. – M. : Nauka, 1986. – 291 p.
13. Gritsenko A.I. Ecology. Oil and gas / A.I. Gritsenko, G.S. Akopova, V.M. Maksimov. – M. : Nauka, 1997. – 598 p.
14. Biopreparation for cleaning environmental objects from oil and oil products / V.M. Saxon, S.A. Kuznetsov, A.V. Kretov [et al.] // Russian Federation Patent № 2138451. Application: 97120732/13 dated 05.12.1997. Published: 27.09.1999.