

DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-1-144-153
УДК 502.36:681.86

Н.Г. Джавадов (ПО «Промавтоматика», г. Баку, Азербайджанская Республика),
Р.А. Эминов (Азербайджанский государственный университет нефти
и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика),
Н.З. Мурсалов (Государственный институт водных проблем, г. Баку,
Азербайджанская Республика), **А.А. Фатуллаев** (НИИ Аэрокосмической информатики
Национального аэрокосмического агентства, г. Баку, Азербайджанская Республика)

МЕТОД АДАПТИВНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ БИОРЕМЕДИАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ ЗЕМЛЯНОЙ МАССЫ

Natig H. Djavadov (National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan),
Ramiz A. Eminov (Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku,
Republic of Azerbaijan), **Nemat Z. Mursalov** (State Research Institute of Water
Problems, Baku, Republic of Azerbaijan), **Akif A. Fatullayev** (Research Institute
of Aerospace Informatics of National Aerospace Agency, Baku,
Republic of Azerbaijan)

ADAPTIVE OPTIMIZATION BIOREMEDIATION METHOD OF OIL AND OIL PRODUCTS POLLUTION OF SOIL PLOTS

Введение

Загрязнение почвы нефтью и нефтепродуктами приобретает все большие масштабы, что подчеркивает актуальность данной темы и дальнейшей оптимизации методов ремедиации загрязненной земляной массы.

Цели и задачи

Разработка метода адаптивной оптимизации процедуры биоремедиации загрязненной нефтью земляной массы, осуществляемой с использованием группы бактерий.

Результаты

Исследованы вопросы оптимизации биоремедиации загрязненных нефтью и нефтепродуктами земляной массы.

Показано, что при использовании бактерий для очистки загрязненной нефтяными углеводородами земляной массы в специ-

Background

Oil and oil products pollution of oil is becoming increasingly large, which underlines the relevance of this topic and further optimization of remediation methods for contaminated soil plots.

Aims and Objectives

Development of a method for adaptive optimization of the bioremediation procedure for an oil-polluted soil plots carried out using a bacteria.

Results

The problems of optimizing soil polluted with oil and oil products bioremediation have been investigated.

It is shown that when bacteria are used to clean the soil polluted by petroleum hydrocarbons in special containers, the factors influence can be either regular or extreme, depending on the this factor specific type.

альных контейнерах характер влияния воздействующих факторов может быть как регулярным, так и экстремальным, в зависимости от конкретного вида этого фактора.

При этом для выбора оптимального рабочего режима производства биомассы бактерий может быть использован математический метод линейного программирования. Показано, что при наличии крутых экстремумов в кривых зависимости биомассы бактерий от воздействующего фактора происходит скачкообразное смещение оптимальной рабочей точки, обеспечивающей производство наибольшего количества биомассы. Указанное обстоятельство диктует необходимость разработки метода адаптивной оптимизации всей процедуры биоремедиации, где оптимальные режимные параметры должны быть вычислены после определения pH среды.

At the same time, a mathematical linear programming method can be used to select the optimal operating mode for the bacteria biomass production. It is shown that in the presence of steep extremes in the dependence curves of the bacteria biomass on the influencing factor, there is an abrupt shift of the optimal operating point, which ensures the greatest biomass amount production. This circumstance dictates the need to develop an adaptive optimization method for the entire bioremediation procedure, where the optimal operating parameters must be calculated after determining the medium pH.

Ключевые слова: биоремедиация, нефтепродукты, загрязнение почвы, оптимизация, линейное программирование

Key words: bioremediation, oil products, soil pollution, optimization, linear programming

Введение

Загрязнение почвы нефтью и нефтепродуктами приобретает все большие масштабы, что подчеркивает актуальность разработки и дальнейшей оптимизации методов ремедиации загрязненной земляной массы. В целом, согласно [1], существует *следующая классификация методов ремедиации загрязненной нефтью почвы*.

1. Биологические методы:

- выделение пара почвы;
- фиторемедиация;
- окисление путем аэрации и др.

2. Физические методы:

- промывка почвы;
- удаление сольвента;
- использование сорбентов и др.

3. Термохимические методы:

- солидификация/стабилизация;

- термальная десорбция;
- озонирование;
- электро-биорекламация и др.

В таблице 1 приведены основные показатели широко используемых методов ремедиации земляной массы.

Как отмечается в работе [2], загрязнение почвы дизельным топливом и использованным моторным маслом превращается в одну из основных экологических проблем. Биоремедиация почвы является экологически наиболее безопасным и экономически эффективным методом для очистки загрязненной нефтью почвы.

Биоремедиация почвы осуществляется с помощью специальных, устойчивых к стрессу микробов, которые должны быть способны осуществить нефтедеструкцию, а также выжить в разнообразных географических и климатических условиях.

Таблица 1. Основные показатели широко используемых методов ремедиации земляной массы

Метод	Обработка	Расходы	Время
Фиторемедиация	Тяжелые металлы, радионуклиды, углеводороды ПАУ, сурфактанты	(10 ÷ 50) US \$/t	2 года
Выделение пара почвы	ЛОС	(20 ÷ 50) US \$/t	2 года
Биореакторы	Бензол, этилбензол, ксилол	(20 ÷ 150) US \$/t	от 1 недели до нескольких месяцев
Бактериальная обработка	Углеводороды	–	от 1 недели до нескольких месяцев

Как было отмечено в работе [3], микробный штамм *Bacillus cereus* DRDUI может осуществить нефтеструкцию в объеме 77 %, 67 % и 16 % дизеля, сырой нефти и использованного моторного масла при отсутствии внешних нитратов (N) и фосфатов (P). Однако, при наличии N и P степень биодеструкции резко увеличивается до 99 %, 84 % и 29 % соответственно.

Важным условием биоремедиации с использованием микроорганизмов является их соответствующая метаболическая деятельность, т.е. способность продуцировать биосурфактанты, содержащих различные химические структуры, такие как полисахариды, жирные кислоты, гликолипиды, пептиды, протеины.

Согласно работе [4], способность нефтеструкции бактерий уменьшается в водной среде с высокой кислотностью или щелочностью. При этом требуется специальный подбор величины pH для достижения приемлемого времени полиароматического углеводородного биодеградирования. Было обнаружено, что мезотермические бактерии являются оптимальными деградантами нефти при pH = 7,0-7,5.

Было определено, что бактерии типа *Pseudomonas aeruginosa*, *Coronobacter sakazakii*, *Klebsiella oxytoca*, *Bordetella Bronchi Sptica* при совместной деятельности прояв-

ляют высокую эффективность в биодеструкции нефти.

Согласно работе [4], для проведения оптимизации процесса биодеструкции двух типов ливийской нефти было учтено влияние следующих факторов:

- 1) концентрация сырой нефти (тяжелой и легкой);
- 2) концентрация твердых отходов;
- 3) инкубационный период.

Для анализа биоремедиации тяжелой и легкой нефти применена полиномиальная математическая модель с многофакторным регрессионным анализом. Максимальный результат биоремедиации в неоптимальном режиме равен 97,05 % и 99,10 % для тяжелой и легкой нефти соответственно [4]. При оптимальном режиме, где требовалось минимизировать используемые твердые отходы за короткое время инкубации, получены следующие результаты: 84,42 % и 95,70 % соответственно, при использовании отходов в количестве 0,21 г/л и 0,20 г/л.

Как сообщается в работе [5], среди 16 видов ПАУ, обнаруженных в почве, 11 были подвержены анализу для оценки риска канцерогенности.

Среди группы ЛОС наиболее опасными загрязнителями оказались этилбензол и бензол, а среди тяжелых металлов были исследованы медь, железо, никель, свинец и др.

В таблице 2 приведены коэффициенты патогенности (k) некоторых элементов и соединений, обнаруженных на месте загрязнения почвы нефтью.

Согласно работе [6], изучение различных параметров, воздействующих на бакте-

рии, позволили осуществить параметрическую оптимизацию таких бактерий, как *Bacillus cereus*, *Halomonas dadingensis* и др., выделенных из почвы. Оптимальными значениями pH являются 5,0-8,0 при 37 °С, с добавлением NaCl при концентрации 5,0-20,0 %.

Таблица 2. Коэффициенты патогенности некоторых элементов и соединений

Вещество	Коэффициенты патогенности k, (мг/кг/день) ⁻¹	Вещество	Коэффициенты патогенности k, (мг/кг/день) ⁻¹
Бензол	$3,5 \cdot 10^{-2}$	Арсен	1,5·100
Этилбензол	$1,1 \cdot 10^{-2}$	Кадмий	1,5·10
Бензоантрацин	1,2·100	Хром (гексов.)	$4,2 \cdot 10^{-1}$
Антрацин	$2,3 \cdot 10^{-1}$	Никель	$9,1 \cdot 10^{-1}$
Бензопирен	1,2·10	Свинец	$8,5 \cdot 10^{-3}$

Постановка задачи

Почва является важнейшим источником микробов, способствующих биодegradации углеводов.

Согласно [7], оптимизация роста бактериальных штампов, способных эффективно очищать земляную массу от дизельного топлива, может быть осуществлена по следующим воздействующим факторам:

- влияние pH на рост бактерий в период биодegradации дизельного топлива;
- влияние температуры на рост бактерий в период биодegradации дизельного топлива;
- влияние различных концентраций дизельного топлива на рост бактерий в период биодegradации этого топлива;
- влияние углерода на бактериальный рост;
- влияние азота на бактериальный рост.

На рисунке 1 показаны кривые показателя роста трех видов бактерий в зависимости от величины pH в водной среде.

Как видно из представленных на рисунке 1 графиков, имеется явный экстремум по-

казателя роста в зависимости от степени pH обработки почвы.

На рисунке 2 приведена диаграмма температурной зависимости показателя роста различных бактерий.

Как видно из приведенных на рисунке 2 графиков, биомасса бактерий при фиксированной температуре имеет явный максимум по видам бактерий. При этом с ростом температуры наблюдается рост биомассы бактерий.

На рисунке 3 приведены кривые зависимости показателя роста бактерий от концентрации дизельного топлива.

Как видно из рисунка 3, показатель роста бактерий непрерывно уменьшается с ростом концентрации дизельного топлива.

Как следует из вышеизложенного, описанные в [1-7] экспериментальные исследования в основном охватывали вопрос о влиянии *одного воздействующего фактора* на рост бактерий.

Далее в данной статье исследуется вопрос о *совместном воздействии нескольких независимых факторов* на показатель роста бактерий.

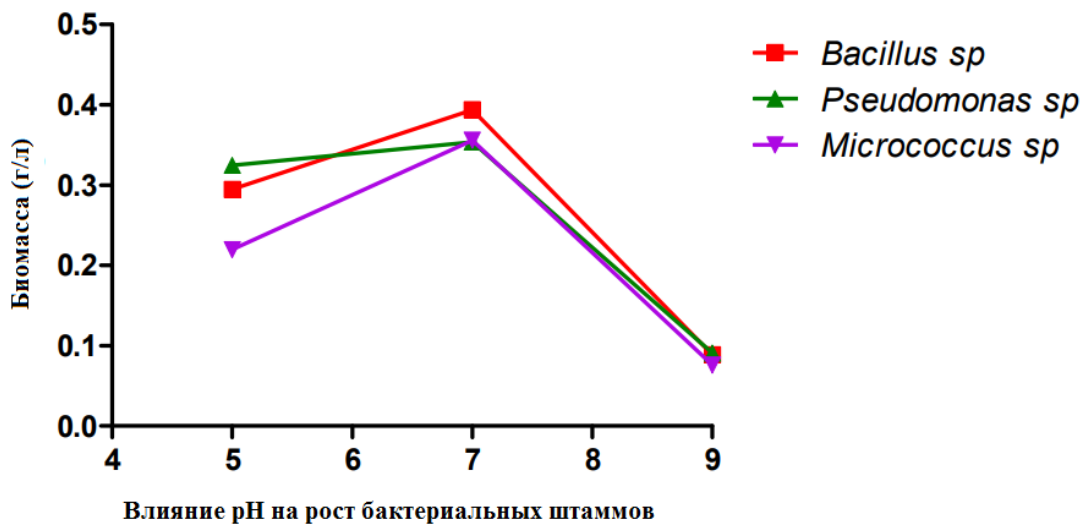


Рисунок 1. Кривые показателя роста трех видов бактерий в зависимости от величины pH в водной среде [7]

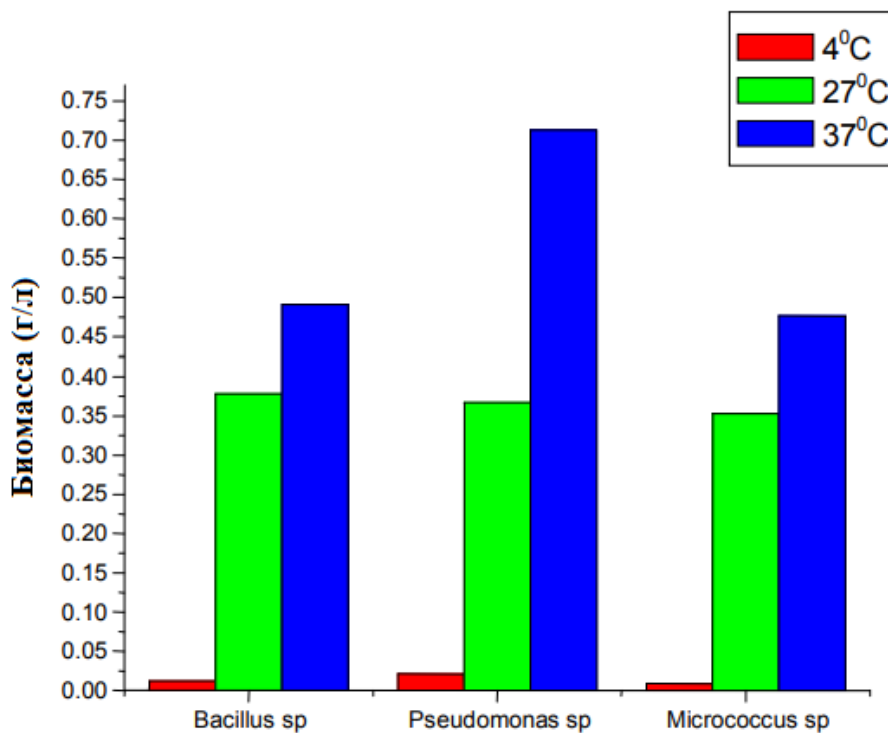


Рисунок 2. Влияние температуры на рост трех видов бактерий

С учетом принятых выше допущений формируется оптимизационная задача линейного программирования. Согласно известной процедуре метода линейного программирования [8], для решения поставленной задачи должны быть сформированы следующие ограничительные условия:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dB_1}{dF_1} \Delta F_1 + \frac{dB_1}{dF_2} \Delta F_2 + \dots + \frac{dB_1}{dF_n} \Delta F_n < a_1 \\ \frac{dB_2}{dF_1} \Delta F_1 + \frac{dB_2}{dF_2} \Delta F_2 + \dots + \frac{dB_2}{dF_n} \Delta F_n < a_2 \\ \dots \dots \dots \\ \frac{dB_m}{dF_1} \Delta F_1 + \frac{dB_m}{dF_2} \Delta F_2 + \dots + \frac{dB_m}{dF_n} \Delta F_n < a_m \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где ΔF_i – приращение i -го фактора.

При этом целевая функция проводимой процедуры оптимизации имеет следующий вид:

$$M = \Delta F_1 \left(\sum_{j=1}^m \frac{dB_j}{dF_1} \right) + \Delta F_2 \left(\sum_{j=1}^m \frac{dB_j}{dF_2} \right) + \dots + \Delta F_n \left(\sum_{j=1}^m \frac{dB_j}{dF_n} \right) \dots (5)$$

Таким образом, целью проводимой оптимизации является нахождение такого оптимального множества ΔF_{opt}

$$\Delta F_{opt} = \{ \Delta F_{1opt}, \Delta F_{2opt}, \dots, \Delta F_{nopt} \}, \quad (6)$$

при котором M достигнет экстремального (максимального) значения.

При уменьшении количества воздействующих факторов до двух решение данной задачи линейного программирования может быть осуществлено геометрическим методом.

Рассмотрим решение задачи достижения максимума M применительно к случаю наличия двух воздействующих факторов: рН и температуры.

Рассмотрим вопрос о составлении ограничительных условий с учетом экстремального характера влияния рН на биомассу бактерий.

Как видно из графиков, представленных на рисунке 1, при $pH \leq 7$ наблюдается рост биомассы в зависимости от рН; при $pH > 7$ происходит уменьшение биомассы.

Следовательно, оптимизация, проводимая для определения оптимальных величин ΔF_1 и ΔF_2 , должна быть осуществлена в два этапа.

Применительно к случаю $pH \leq 7$ составляются следующие условия ограничения:

$$\frac{dB_1}{d\Delta F_{11}} \Delta F_{11} + \frac{dB_1}{d\Delta F_{21}} \Delta F_{21} < d_1, \quad (7.1)$$

$$\frac{dB_2}{d\Delta F_{11}} \Delta F_{11} + \frac{dB_2}{d\Delta F_{21}} \Delta F_{21} < d_2, \quad (7.2)$$

$$\frac{dB_3}{d\Delta F_{11}} \Delta F_{11} + \frac{dB_3}{d\Delta F_{21}} \Delta F_{21} < d_3, \quad (7.3)$$

где d_1, d_2, d_3 - заданные постоянные.

Применительно к случаю $pH > 7$ составляются следующие условия ограничения:

$$\frac{dB_1}{d\Delta F_{12}} \Delta F_{12} + \frac{dB_1}{d\Delta F_{22}} \Delta F_{22} < d_4, \quad (8.1)$$

$$\frac{dB_2}{d\Delta F_{12}} \Delta F_{12} + \frac{dB_2}{d\Delta F_{22}} \Delta F_{22} < d_5, \quad (8.2)$$

$$\frac{dB_3}{d\Delta F_{13}} \Delta F_{12} + \frac{dB_3}{d\Delta F_{22}} \Delta F_{22} < d_6, \quad (8.3)$$

где d_4, d_5, d_6 - исходно заданные постоянные.

Целевые функции, применительно к первому и второму этапу оптимизации, имеют следующий вид:

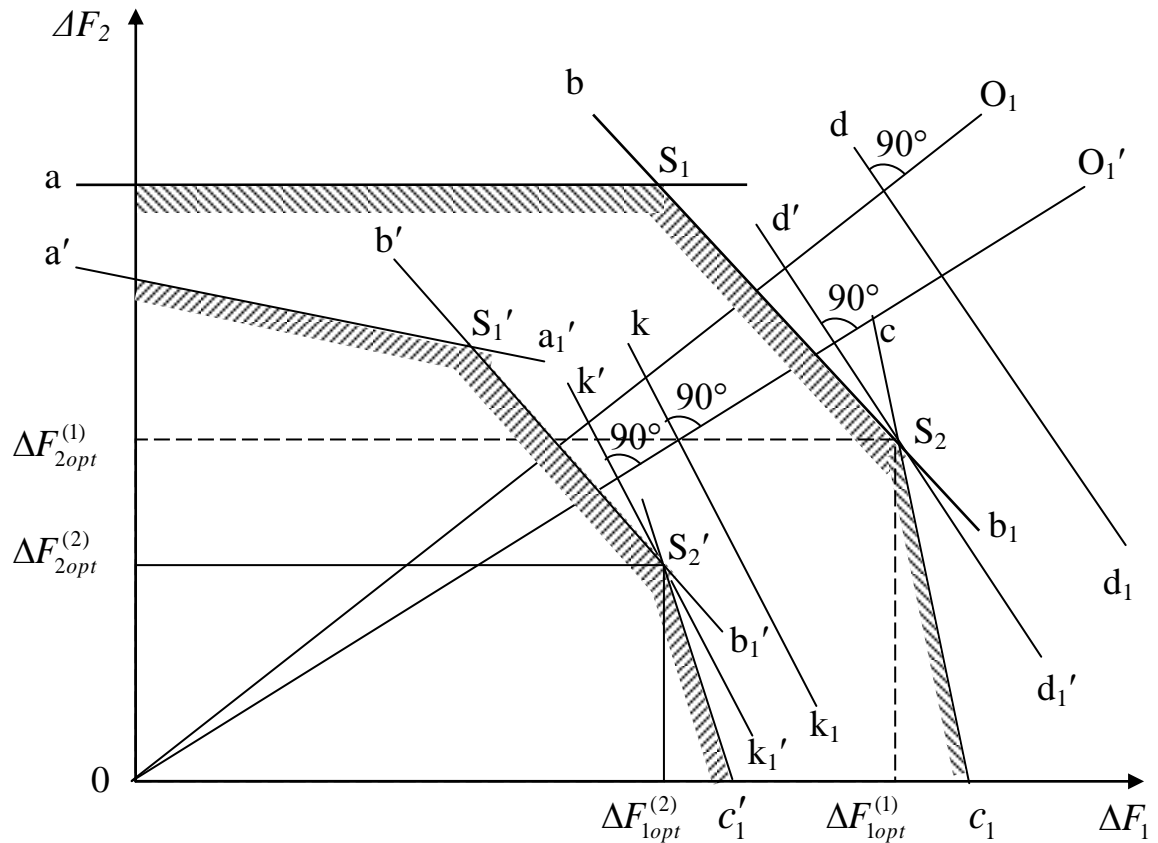
для первого этапа

$$M_1 = \Delta F_{11} \left(\sum_{j=1}^3 \frac{dB_j}{dF_{11}} \right) + \Delta F_{21} \left(\sum_{j=1}^3 \frac{dB_j}{dF_{21}} \right); \quad (9)$$

для второго этапа

$$M_2 = \Delta F_{12} \left(\sum_{j=1}^3 \frac{dB_j}{dF_{12}} \right) + \Delta F_{22} \left(\sum_{j=1}^3 \frac{dB_j}{dF_{22}} \right). \quad (10)$$

Условное графическое решение двухэтапной задачи программирования показано на рисунке 4.



- aa₁, bb₁, cc₁ - ограничительные линии, соответствующие условиям (7.1)-(7.3) соответственно;
- OO₁ - центральная линия, сформированная на основе выражения (9) при M₁=0;
- dd₁ и d'd₁ - основание опорной плоскости в двух позициях;
- S₁, S₂ - узловые точки;
- ΔF_{1opt}⁽¹⁾, ΔF_{2opt}⁽¹⁾ - координаты точки S₂, взятой в качестве оптимальной точки;
- a'a₁, b'b₁, c'c₁ - ограничительные линии, соответствующие условиям (8.1)-(8.3);
- OO'₁ - центральная линия, соответствующая выражению (10) при M₂ = 0;
- S'₁, S'₂ - узловые точки;
- kk₁, k'k'₁ - основание опорной плоскости, в двух позициях;
- ΔF_{1opt}⁽²⁾, ΔF_{2opt}⁽²⁾ - координаты точки S'₂, взятой в качестве оптимальной

Рисунок 4. Условное графическое решение двухэтапной задачи оптимизации по процедуре линейного программирования

Как видно из графического решения задачи, представленного на рисунке 4, при условии $pH \leq 7$ оптимальной рабочей точкой оказывается точка S_2 .

При $pH > 7$ происходит смещение оптимальной точки в позицию S'_2 .

Такое скачкообразное изменение оптимального режима может быть объяснено резким изменением крутизны линий в точке $pH = 7$ на рисунке 1.

Таким образом, показано, что наличие крутых экстремумов в функциональной зависимости биомассы бактерий от воздействующих факторов может привести к необходимости адаптивного скачкообразного изменения оптимальных рабочих точек процесса роста биомассы бактерий под влиянием воздействующих факторов.

Выводы

1. Показано, что при использовании бактерий для очистки загрязненной нефтью и нефтепродуктами почвы характер влияния воздействующих факторов может быть как регулярным, так и экстремальным, в зависимости от конкретного вида этого фактора.

2. Показано, что для выбора оптимального рабочего режима производства биомассы бактерий может быть использован математический метод линейного программирования.

3. Показано, что при наличии крутых экстремумов в кривых зависимости биомассы бактерий от воздействующего фактора необходимо скачкообразное смещение оптимальной рабочей точки, обеспечивающее производство наибольшего количества биомассы.

Список литературы

1. Zamani M.M., Fallahpour M., Harvani G.Y., Aghmiuni S.Kh., Zamani M., Tehrani D.M., Firrozabadi Gh.S. Recent Proportionate Treatment Methods for Crude Oil Contamination Evaluation of the Tehran Refinery Site Soil. *Thrita*, 2014 March; 3(1): e12113. Published online 2014 February 1. DOI:10.5812/thrita.12113.
2. Borah D., Yadav R.N.S. Bioremediation of Petroleum Based Contaminants with Biosurfactant Produced by a Newly Isolated Petroleum Oil Degrading Bacterial Strain // *Egyptian Journal of Petroleum / Egyptian Petroleum Research Institute*. www.elsevier.com/locate/egyjp.
3. Crebelli R., Conti L., Crochi B., Carere A., Bertoli C., Giacomo N.D. *Mutat. Res.* 346 (1995) 167-172.
4. Azab El-Liethy M., Hemdan B.A.S., Samhan F.A., Ali S.S., El-Taweel G.E. Optimizing Conditions for Crude Oil Degrading Bacterial Consortium Isolated from Aquatic Environment.
5. Cocârță D.M., Stoian M.A., Karademir A. Crude Oil Contaminated Sites: Evaluation by Using Risk Assessment Approach // *Sustainability*. 2017. No. 9. P. 1365.
6. Preeti Singh, Dipali Parmar, Ajit Pandya. Parametric Optimization of Media for the Crude Oil Degrading Bacteria Isolated from Crude Oil Contaminated Site // *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 2015. No. 4 (2). P. 322-328. <http://www.ijcmas.com>.
7. Mahalingam P.U., Nithya Sampath. Optimization of Growth Condition for Diesel Oil Degrading Bacterial Strains // *Pelagia Research Library Advances in Applied Science Research*. 2014. No. 5 (6).

References

1. Zamani M.M., Fallahpour M., Harvani G.Y., Aghmiuni S.Kh., Zamani M., Tehrani D.M., Firrozabadi Gh.S. *Recent Proportionate Treatment Methods for Crude Oil Contamination Evaluation of the Tehran Refinery Site Soil*. *Thrita*, 2014 March; 3(1): e12113. Published online 2014, February 1. DOI:10.5812/thrita.12113.
2. Borah D., Yadav R.N.S. Bioremediation of Petroleum Based Contaminants with Biosurfactant Produced by a Newly Isolated Petroleum Oil Degrading Bacterial Strain. *Egyptian Journal of Petroleum (Egyptian Petroleum Research Institute)*. www.elsevier.com/locate/egyjp.
3. Crebelli R., Conti L., Crochi B., Carere A., Bertoli C., Giacomo N.D. *Mutat. Res.* 1995. No. 346. P. 167-172.
4. Azab El-Liethy M., Hemdan B.A.S., Samhan F.A., Ali S.S., El-Taweel G.E. *Optimizing Conditions for Crude Oil Degrading Bacterial Consortium Isolated from Aquatic Environment*.
5. Cocârță D.M., Stoian M.A., Karademir A. Crude Oil Contaminated Sites: Evaluation by Using Risk Assessment Approach. *Sustainability*, 2017, No. 9, pp. 1365.
6. Preeti Singh, Dipali Parmar, Ajit Pandya. Parametric Optimization of Media for the Crude Oil Degrading Bacteria Isolated from Crude Oil Contaminated Site. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 2015, No. 4 (2), pp. 322-328. <http://www.ijcmas.com>.
7. Mahalingam P.U., Nithya Sampath. Optimization of Growth Condition for Diesel Oil Degrading Bacterial Strains. *Pelagia Research Library Advances in Applied Science Research*. 2014. No. 5 (6).

P. 91-96. Available at: www.pelagiaresearch-library.com.

8. Бодров В.И., Лазарева Т.Я., Мартемьянов Ю.Ф. Математические методы принятия решений. Тамбов, 2004. 124 с.

P. 91-96. Available at: www.pelagiaresearch-library.com.

8. Bodrov V.I., Lazareva T.Ya., Martemyanov Yu.F. *Matematicheskie metody prinyatiya resheniy* [Mathematical Methods for Decision Making]. Tambov, 2004. 124 p. [in Russian].

Авторы

• Джавадов Натиг Гаджи оглы, д-р техн. наук, профессор

Национальное аэрокосмическое агентство
Генеральный директор
Азербайджанская Республика, Az1115, Баку,
ул. С.С. Ахундова, 1
e-mail: Javadov.n.g@mail.ru

• Эминов Рамиз Ахмед оглы, канд. техн. наук,
Азербайджанский государственный университет
нефти и промышленности

Доцент кафедры «Поиск и разведка
месторождений нефти и газа»
Азербайджанская Республика, Az1010, Баку,
пр. Азадлыг, 20
e-mail: Eminovramiz@mail.Ru

• Мурсалов Немат Закир оглы
Азербайджанский государственный университет
нефти и промышленности

Инженер кафедры «Поиск и разведка
месторождений нефти и газа»
Докторант Института водных проблем
Азербайджанская Республика, AZ 1010, Баку,
пр. Азадлыг, 20
e-mail: Mursalovnemat@mail.Ru

• Фатуллаев Акиф Аллахверди оглы
НИИ Аэрокосмической информатики
Национального аэрокосмического агентства
Главный инженер

Азербайджанская Республика, Az1115, Баку,
ул. С.С. Ахундова, 1
e-mail: Fatullayev.a@mail.ru

The Authors

• Djavadov Natig H., Doctor of Engineering Sciences,
Professor

National Aerospace Agency
General Director
1, S.S. Akhundov str., Baku, Az1115,
Republic of Azerbaijan
e-mail: Javadov.n.g@mail.ru

• Eminov Ramiz A., Candidate of Engineering
Sciences

Azerbaijan State Oil and Industry University
Assistant Professor of Search and Survey of Oil
and Gas Deposits Department
20, Azadlig ave., Baku, Az1010, Republic
of Azerbaijan
e-mail: Eminovramiz@mail.Ru

• Mursalov Nemat Z.

Azerbaijan State Oil and Industrial University
Engineer of Search and Survey of Oil and Gas
Deposits Department
Doctorant of Institute of Water Problems
20, Azadliq ave., Baku, Republic of Azerbaijan,
AZ 1010
e-mail: Mursalovnemat@mail.ru

• Fatullayev Akif A.

Research Institute of Aerospace Informatics
of National Aerospace Agency
Chief Engineer
1, S.S. Akhundov str., Baku, Az1115,
Republic of Azerbaijan
e-mail: Fatullayev.a@mail.ru