

# Оптимизация процесса фиторемедиации толуола в замкнутых загрязненных производственных участках

**М.М. Агагусейнова**, профессор, д-р хим. наук,  
**С.О. Мамедова**, диссертант

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку

e-mail: mamedova-2014-mail.r@mail.ru

**Ключевые слова:**  
фиторемедиация,  
толуол,  
загрязнение,  
растительность,  
оптимизация,  
эффективность.

*Статья посвящена оптимизации процесса фиторемедиации толуола на экологически загрязненных участках. Рассмотрена и решена задача оптимизации процесса фиторемедиации замкнутых производственных участков с негетерогенным уровнем загрязнения воздуха толуолом. Для оптимизации последовательной фиторемедиации вводится понятие интенсивности фиторемедиации, на усредненное значение которого налагается ограничение. Показано, что при последовательной фиторемедиации участков, загрязненных толуолом, в случае негетерогенности загрязнения участков для оптимизации процесса фиторемедиации по предложенному критерию должна быть обеспечена нелинейная зависимость между скоростью удаления загрязнителя и длительностью одного подцикла очищения.*

## 1. Введение в проблему

Толуол относится к группе ароматических углеводородов. Будучи токсичным химическим соединением, толуол загрязняет воздух и может оказать вредное воздействие на организм человека [1–2]. Толуол (C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>), или метилбензол, фенилметан, метацид, — бесцветная летучая жидкость, способная воспламеняться и взрываться в воздухе. Толуол — химический продукт, вырабатываемый при переработке нефти [3–4]. Толуол оказывает сильное вредное воздействие на живые организмы и считается ядовитой технической жидкостью. Вдыхание паров толуола может вызвать угнетение центральной нервной системы, а при повторном вдыхании происходит хроническое отравление [5], возникают мышечная слабость, расстройство желудка, нервно-психические нарушения, проявляется депрессия или возбужденное состояние.

Вышеуказанные свойства толуола диктуют необходимость разработки и совершенствования различных методов очищения замкнутых территорий, загрязненных нефтепродуктами, в том числе толуолом. Одним

из эффективных методов очищения замкнутых производственных участков, загрязненных толуолом, является фиторемедиация — использование растений для очищения загрязненной среды, включая воздух, почвы, осадки и поверхностные воды. Фиторемедиация экономически эффективная и экологически совместимая технология для очистки окружающей среды от ряда загрязнителей — нефтяных углеводородных соединений, хлорсодержащих растворителей, пестицидов, тяжелых металлов и др. [6, 7, 8].

Процесс фиторемедиации делится на этапы: сбор органических соединений из очищаемой среды; аккумуляция или обработка этих химических веществ с помощью процессов лигнификации, волатилизации, метаболизации и минерализации. Технологически реализация метода фиторемедиации состоит в размещении на замкнутых загрязненных участках специально выбранных видов растительности, которые аккумулируют загрязняющее вещество. Далее осуществляются сбор и специальная обработка данного вида растения. Очевидно, что повышение эффективности и оптимизация подобных ремедиа-

ционных процедур важны для оздоровления экологического состояния замкнутых производственных территорий, где широко используется толуол.

В [9] рассмотрена задача оптимизации процесса фиторемедиации почв, загрязненных умеренно гидрофобными углеводородами и характеризующихся показателем  $\log k_{ow} = 1-3$ , где  $k_{ow}$  — коэффициент разделения «октанол–вода». Показана возможность оптимизации — минимизации остаточного количества загрязнителей для группы углеводородов, у которых  $\log k_{ow} > 1,78$ .

Согласно [10], повышение эффективности фиторемедиации возможно при применении генетически модифицированных растений в этих целях. Такие трансгенные растения обладают высокой способностью аккумулировать углеводородные загрязнители, а также способствуют ускорению процессов деградации углеводородов в почве.

Как указывается в [11], к методам повышения степени удаления толуола из загрязненной воздушной среды с помощью растений относится использование бегонии пятнистой (*Begonia maculata Raddi*) и ряда других видов. При этом эффективность удаления толуола с помощью растений может быть повышена значительным образом, если предварительно обработать эти растения толуолом в концентрации 1,3 ppm в течение 12 часов. При этом согласно [11] можно достигнуть шестикратного повышения эффективности фиторемедиации.

Цель настоящего исследования — оптимизация процесса очистки загрязненного толуолом воздуха в замкнутой местности с помощью вышеописанной технологии фиторемедиации, предусматривающей предварительную обработку растения толуолом. Задача исследования — оптимизация процесса фиторемедиации воздуха неомогенных замкнутых

участков по критерию достижения максимальной величины относительного значения скорости фиторемедиации при наличии ограничения на общее количество проводимых процедур фиторемедиации. При этом имеется в виду, что уровни загрязнения участков различаются.

## 2. Материалы и метод исследований

Эксперимент по изучению влияния предварительной обработки растения толуолом на фиторемедиационную способность проводился следующим образом [11]. Растения трех видов — ардисия японская (*Ardisia japonica*), бегония пятнистая (*Begonia maculata*), ардисия городчатая (*Ardisia crenata*), — пересаженные в горшки и помещенные в камеру в течение 12 часов были подвержены влиянию газа толуола концентрацией 3,5 ppm (13,181 мкг·м<sup>-3</sup>). Далее растения были выведены на свежий воздух и хранились там в течение 12 часов. После указанной обработки растений толуолом изучались их фиторемедиационные характеристики. На рис. 1 приведены графики зависимости аккумулированного количества толуола, удаленного с помощью обработанного толуолом растения бегония пятнистая [11].

На оси абсцисс ноль соответствует 12 часам после завершения обработки растения толуолом. На оси абсцисс показана длительность помещения растения в газовую среду. Цифрами обозначены: 1 —  $T_1 = 0$ ; 2 —  $T_1 = 1$  неделя; 3 —  $T_1 = 2$  недели; 4 —  $T_1 = 3$  недели. Как видно из графиков, представленных на рис. 1, с увеличением показателя  $T_1$  абсолютное значение удаленного толуола уменьшается.

На рис. 2 приведены графики изменения скорости удаления толуола в зависимости от  $T_2$ , где  $T_2$  — интервал времени между нулевой точкой и моментом помещения обработанного растения в газовую среду.

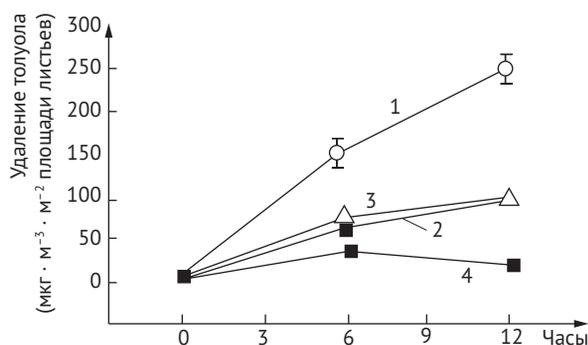


Рис. 1. Зависимость абсолютной величины удаленного толуола от времени нахождения обработанного растения в очищаемой среде, заполненной газом толуола ( $T_1$ ) [11]

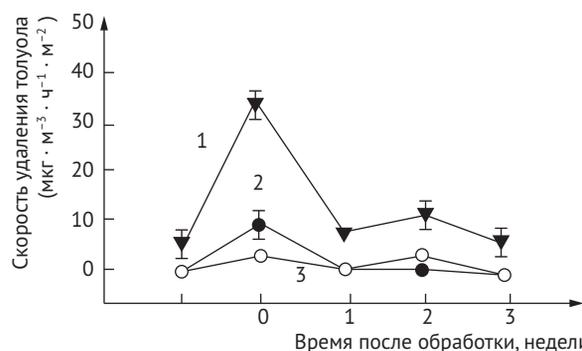


Рис. 2. Зависимость скорости удаления толуола от показателя  $T_2$  для трех видов обработанных растений: 1 — ардисия японская (*Ardisia japonica*); 2 — бегония пятнистая (*Begonia maculata*); 3 — ардисия городчатая (*Ardisia crenata*) [11]

Как видно из графиков, приведенных на рис. 2, скорость удаления толуола у разных растений резко отличается и по истечении одной недели после стимулирования резко уменьшается.

В соответствии с графиками, представленными на рис. 1, эффективность удаления толуола  $K_{a_1}$  определяется по следующей формуле

$$K_{a_1} = \frac{m_0}{V_0 S_0}, \quad (1)$$

где:  $m_0$  — вес удаленного загрязнителя;  $U_0$  — объем очищенной среды;  $S_0$  — площадь листьев растения, участвующего в процессе фиторемедиации.

Особенность предлагаемого метода оптимизации процесса фиторемедиации заключается в использовании критерия оптимизации, существенно отличающегося от критерия (1). Задача оптимизации фиторемедиации формулируется следующим образом. В течение общего цикла, длительностью  $T_0$ , требуется последовательно очистить неидентично загрязненные производственные участки в количестве  $N$  так, чтобы показатель эффективности  $K_{отн}$  достиг максимальной величины. Для решения задачи оптимизации фиторемедиации негомогенных участков будет использован критерий в виде функционала эффективности, максимизация которой осуществляется путем решения задачи безусловной вариационной оптимизации.

### 3. Решение задачи оптимизации

Отметим, что для решения задачи используем линеаризованную модель зависимости скорости удаления от времени. Условное графическое отображение трехпроцедурного общего цикла последовательной фиторемедиации показано на рис. 3.

Рассмотрим многоцикловую технологию фиторемедиации негомогенных участков, в котором уровни

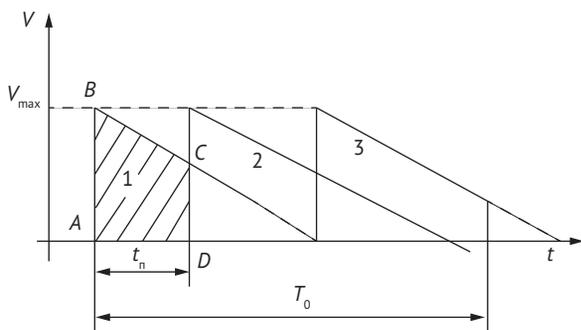


Рис. 3. Трехпроцедурный цикл фиторемедиации производственных участков.  
Обозначения:  $V_{max}$  — максимальная скорость удаления;  $t_n$  — длительность одного подцикла удаления.

загрязнения воздуха в замкнутых производственных участках различны. При этом длительность одной процедуры может достичь величины одного цикла  $T_0$ , а в каждом цикле значение  $V$  различно. Введем в рассмотрение показатель интенсивности фиторемедиации  $\alpha$  для негомогенных участков, определяемый как

$$\alpha = \frac{V}{t_{II}}, \quad (2)$$

Ограничительное условие на усредненную величину интенсивности фиторемедиации определим как

$$M_1 = \int_0^{V_{max}} \frac{V}{t_{II}} dV = C_1, \quad (3)$$

где  $C_1 = \text{const}$ .

Усредненную за все циклы относительную величину скорости фиторемедиации определим как

$$M_2 = \int_0^{V_{max}} (V - k \cdot t_{II}) dV. \quad (4)$$

Заметим, что в формулах (3) и (4) принято допущение о том, что значения  $V$  во всех циклах равномерно распределены в пределах непрерывного регулярного интервала  $0-T_0$ .

С учетом выражений (3) и (4) составляем оптимизационную задачу безусловной вариационной оптимизации в смысле нахождения оптимальной зависимости

$$t_{II} = f(V). \quad (5)$$

Имеем

$$M_0 = M_1 - \lambda M_2. \quad (6)$$

С учетом выражений (3)–(6) получим

$$M_0 = \int_0^{V_m} [V - k \cdot f(V)] dV - \lambda \int_0^{V_m} \frac{V}{f(V)} dV, \quad (7)$$

где  $\lambda$  — множитель Лагранжа

Согласно методу Эйлера [12] оптимальная функция  $t_{II} = f(V)$ , приводящая функционал (7) к его экстремальной величине, должна удовлетворить условию

$$F_1 = \frac{d \left\{ [V - k \cdot f(V)] - \lambda \frac{V}{f(V)} \right\}}{df(V)} = 0. \quad (8)$$

С учетом выражений (7) и (8) получаем

$$-k + \frac{\lambda \cdot V}{f^2(V)} = 0. \quad (9)$$

Из выражения (9) находим

$$f(V) = \sqrt{\frac{\lambda \cdot V}{k}}. \quad (10)$$

$$M_1 = \int_0^{V_m} \frac{\sqrt{V \cdot k}}{\sqrt{\lambda}} dV = C_1. \quad (11)$$

Следовательно,

$$\lambda = 4 \frac{k \cdot V_m^3}{9 \cdot C_1^2}. \quad (12)$$

Из выражений (10) и (12) находим

$$t_{\Pi} = \frac{2 \cdot V_m^{\frac{3}{2}}}{3C_1} \sqrt{V}. \quad (13)$$

Проанализируем тип экстремума функционала (7) путем проверки знака нижеуказанного выражения

$$F_1 = \frac{d^2 \left\{ \left[ V - k \cdot f(V) \right] - \lambda \frac{V}{f(V)} \right\}}{df(V)^2}. \quad (14)$$

Нетрудно проверить, что  $F_1$  всегда отрицательная величина. Следовательно, при решении (13)  $M_0$  достигает максимальной величины. Следовательно, и в этом случае оптимальный режим фиторемедиации достигается при обеспечении нелинейной зависимости (13) между  $V$  и  $t_{\Pi}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. US EPA. Office of Air and Radiation.(ANR-445).Report to Congress on indoor air quality. Vol. II: Assessment and control of indoor air pollution. EPA/400/1-89/001C. August 1989.
2. *Kostiainen R.* Volatile organic compounds in the indoor air of normal and sick houses *Atoms. Environ.* 1995. 29:693-702.
3. EPA. 1990. Drinking Water Criteria Document for toluene ECAO-CIN-408. Environmental Criteria and Assessment. Office of Health and Environmental Assessment,

#### 4. Обсуждение результатов и выводы

Проведена оптимизация процессов последовательной фиторемедиации загрязненных толуолом воздуха замкнутых производственных участков. Был рассмотрен случай многоциклового фиторемедиации негетомогенно загрязненных замкнутых участков. Для учета фактора негетомогенности было использовано усреднение по всем циклам при исходном предположении о том, что значения длительности подцикла в течение многоциклового процесса принимает значения  $0-T_0$ . Диапазон изменения  $V$  равномерный и условно непрерывный в интервале  $0-V_m$ . Решение оптимизационной задачи методом безусловной вариационной оптимизации показало, что оптимальность процесса фиторемедиации может быть обеспечена при соблюдении нелинейной функциональной зависимости между показателями скорости удаления загрязнителя и длительности одного подцикла удаления.

#### 5. Заключение

Показано, что при последовательной фиторемедиации воздуха замкнутых производственных участков, загрязненных толуолом, в случае непостоянства степени загрязнения толуолом, для достижения оптимального цикла фиторемедиации должна быть обеспечена нелинейная зависимость между скоростью удаления и длительностью одного подцикла очищения. При этом следует иметь в виду, что такое решение сформулированной задачи оптимизации фиторемедиации толуола имеет место только при допущении о справедливости принятого ограничительного условия (3) в отношении вновь введенного показателя интенсивности фиторемедиации  $\alpha$ . Полученный результат может быть полезен при проведении воздухоочистительных работ в замкнутых производственных помещениях, расположенных вблизи нефтебаз, нефтеперерабатывающих заводов, в зонах аварий на магистральных нефтепроводах, а также на производственных участках.

- U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, July 1990. [www.epa.gov/dwstandardsregulations](http://www.epa.gov/dwstandardsregulations) (дата обращения: 25.05.2015)
4. Toxicology and carcinogenesis studies of toluene (CAS No. 108-88-3) in F344/N rats and B6C3F1 mice (inhalation studies). Technical Rept. Series No.371. [http://www.researchgate.net/publication/255090972\\_Toxicology\\_and\\_carcinogenesis\\_studies\\_of\\_toluene\\_CAS\\_No\\_108-88-3\\_in\\_F344Nrats\\_and\\_B6C3F1mice](http://www.researchgate.net/publication/255090972_Toxicology_and_carcinogenesis_studies_of_toluene_CAS_No_108-88-3_in_F344Nrats_and_B6C3F1mice). (дата обращения: 25.05.2015)

5. Витрищак С.В., Бондаренко В.В., Изоркина И.И., Гаврик С.Ю., Бондаренко М.В., Санмна Е.В. Воздействие толуола на организм человека и меры профилактики // Украинський журнал клінічної та лабораторної медицини, 2013, том 8, № 2, с. 12–16.  
[Vitrishchak S. V., Bondarenko V. V., Izorkina I. I., Gavrik S. Yu., Bondarenko M. V., Sanmna E. V. Vozdeystvie toluola na organizm cheloveka i mery profilaktiki [Toluene impact on the human body and prevention]. *Ukrains'kiy zhurnal klinichnoi ta laboratornoi meditsini* [Ukrainian magazine klinichnoi that laboratornoi Medicine]. 2013, V. 8, I. 2, pp. 12–16.]
6. Оспанова Ж.Х., Хантурин М.Р. Фиторемедиация нефтезагрязненной сточной воды // Вестник ОГУ № 12(118), 2010, с. 73–78.  
[Ospanova Zh.Kh., Khanturina M.R. Fitoremediatsiya neftezagryaznennoy stochnoy vody [Phytoremediation oily wastewater]. *Vestnik OGU* [Vestnik OSU]. 2010, I. 12(118), pp. 73–78.]
7. Коротченко И.С. Фиторемедиация почв, загрязненных тяжелыми металлами (Co, Ni). <http://www.kgau.ru/new/all/konferenc/konferenc/2013/b5.pdf> (дата обращения: 25.05.2015)  
[Korotchenko I.S. *Fitoremediatsiya pochv, zagryaznennykh tyazhelymi metallami (So, Ni)* [Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals (Co, Ni)]. Available at: <http://www.kgau.ru/new/all/konferenc/konferenc/2013/b5.pdf> (accessed 25 May 2015)]
8. Kathi S., Khan A.B. Phytoremediation approaches to PAH contaminated soil. *Indian Journal of Science and Technology*, 2011, vol.4, № 1, p.56–63.
9. Мустафабейли Х.Ш., Тахмазли М.С., Абдуллаева Л. Дж. Оптимизация процесса фиторемедиации почв загрязненных углеводородами // Вестник ВГУ, серия: Химия. Биология. Фармация, 2014, № 2, с. 72–75.  
[Mustafabeyli Kh.Sh., Takhmazli M.S., Abdullaeva L. Dzh. Optimizatsiya protsessa fitoremediatsii pochv zagryaznennykh uglevodorodami [Optimization of the process of phytoremediation of soils contaminated with hydrocarbons]. *Vestnik VGU, seriya: Khimiya. Biologiya. Farmatsiya* [Vestnik VSU series Chemistry. Biology. Pharmacy]. 2014, I. 2, pp. 72–75.]
10. James C.A., Strand S.E. Phytoremediation of small organic contaminants using transgenic plants. *Curr Opin. Biotechnol.* 2009, 20(2), p. 237–241
11. Kim K.J., Yoo E.H., Kays S.J. Decay Kinetics of Toluene Phytoremediation Stimulation. *Hort. Science.* 47(8), p.1195–1198.
12. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление // Наука 1969, 425 с.  
[Elsgolts L.E. *Differential equations and calculus of variations.* Moscow: Nauka, 1969, 425 p. (in Russian)]

## Optimization of Process of Phytoremediation of Toluene in Ecologically Polluted Areas

**M.M. Agahuseynova**, Doctor of Chemical Sciences, Professor, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku  
**S.O. Mamedova**, Candidate for a Degree, Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku

*The article is devoted to optimization of phytoremediation of toluene in ecologically polluted areas. The tasks of optimization of phytoremediation process in closed production sites the air of which is polluted with toluene non-homogenically are considered and solved. In order to solve the formulated task on optimization of serial phytoremediation the new notion that is intensity of phytoremediation is suggested and the averaged value of latter is imposed by limitation condition. It is shown, that upon carrying out of serial phytoremediation of sites polluted non-homogenically with toluene the optimization of phytoremediation process can be implemented by providing the non-linear dependence between the speed of removal of polluter and duration of one subcycle of remediation.*

**Keywords:** phytoremediation, toluene, pollution, vegetation, optimization, effectiveness.

### Анонс

Журнал «Безопасность в техносфере» в качестве официального органа федерального учебно-методического объединения (ФУМО) по укрупненной группе специальностей и направлений 20.00.00 — «Техносферная безопасность и природообустройство» в 2017 г. начинает публикацию модернизированных федеральных государственных стандартов по укрупненной группе специальностей и направлений 20.00.00, примерных образовательных программ направлений (бакалавриат и магистратура) и специальности и примерных программ дисциплин образовательных программ с методическими комментариями ФУМО и авторов программ. Следите за публикациями, начиная с первого номера 2017 г.