

УДК 531/534: [57+61]

МОДЕЛЬ НЕФТЕОТМЫВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕННОГО ПОЧВОГРУНТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ *RHODOCOCCLUS*-БИОСУРФАКТАНТА

М.С. Куюкина*, И.Б. Ившина*, М.А. Осипенко**, Ю.И. Няшин**, О.А. Коростина**

* Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, Россия, 614081, Пермь, ул. Голева, 13, e-mail: kuyukina@iegm.ru

** Кафедра теоретической механики Пермского государственного технического университета, Россия, 614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: oma@theormech.pstu.ac.ru

Аннотация. Добыча и транспорт нефти неизбежно связаны с загрязнением окружающей среды. В последние годы большое значение приобретают способы биологической очистки (биоремедиации) нефтезагрязненных земель как экологически безопасные. В лаборатории алканотрофных микроорганизмов Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН получены высокоактивные и экологически безопасные биогенные сурфактанты, продуцируемые штаммами алканотрофных родококков, выделенных из природных источников нефтепромысловых районов Пермского края. Полученные *Rhodococcus*-биосурфактанты успешно применяются в технологиях *ex/in situ* биоремедиации нефтезагрязненных почв и грунтов. Для отображения комплексных процессов биоремедиации необходимо создание математических моделей, адекватно отражающих реальные процессы, протекающие в нефтезагрязненной почве под влиянием биосурфактантов. В данной работе предложена математическая модель стационарного процесса нефтеотмывания загрязненного почвогрунта под действием *Rhodococcus*-биосурфактанта. Разработанная модель позволяет на основании экспериментальных данных по фильтрации биосурфактанта в модельной почвенной колонке теоретически оценить условия и эффективность проведения нефтеотмывания в полевых условиях. Полученная теоретическая оценка исследуемых параметров процесса нефтеотмывания качественно совпадает с известными экспериментальными оценками.

Ключевые слова: нефтезагрязненная почва, биоремедиация, нефтеотмывание, *Rhodococcus*-биосурфактант, математическое моделирование, теория фильтрации.

Введение

Добыча и транспорт нефти неизбежно связаны с загрязнением окружающей среды, особенно почвы. Углеводородные компоненты нефти являются высокотоксичными для почвенных биоценозов, вызывая снижение агрофизических и агрохимических показателей почвы и делая ее непригодной для ведения сельского хозяйства. В этой связи потребность в технологиях, направленных на уничтожение последствий углеводородного загрязнения, трудно переоценить.

В последние годы все большее значение приобретают способы биологической очистки (биоремедиации) нефтезагрязненных земель как экологически безопасные. Биологические методы разрушения углеводородов нефти основаны на использовании

ферментативной активности углеводородокисляющих микроорганизмов. Известно два принципиальных подхода к биологической деградации углеводородов в воде и почве: (1) выпуск (интродукция) в загрязненную экосистему специально подобранных ассоциаций микроорганизмов-деструкторов различных классов углеводородных поллютантов (при этом, как правило, используются культуры, выделенные из загрязненных территорий и хорошо адаптированные к местным условиям обитания); (2) активизация аборигенной нефтеокисляющей микрофлоры путем создания оптимальных условий для ее развития.

Для очистки биотопов от нефтяных загрязнений в настоящее время биотехнологическими компаниями Европы и США широко предлагаются микробные препараты, так называемые “бактериальные коктейли”. Однако, как свидетельствует практика, применение заполнивших российский рынок зарубежных бактериальных нефтеокисляющих препаратов, разработанных для районов, резко отличающихся по климатическим и экологическим условиям от нашего региона, часто оказывается мало эффективным. Более того, неконтролируемое внесение в открытые экосистемы искусственных микробных популяций, зачастую неизвестного состава, может представлять значительную опасность как для функционирования почвенных биоценозов, так и для здоровья людей, занятых в технологическом процессе.

Важно заметить, что в климатической зоне Уральского региона, где теплый период года непродолжителен, естественные процессы самоочищения и восстановления нефтезагрязненных почв протекают медленно. Поэтому для Уральского региона особенно актуальны приемы рекультивации с использованием технологий, предусматривающих эффективное стимулирование окисления углеводородов природными нефтеокисляющими микроорганизмами. Существует целый ряд агротехнических приемов, направленных на активацию процессов самоочищения почвы, как то: распашка и рыхление, способствующие увеличению аэрации; увлажнение в сухой период и использование дренажных систем при избыточной влажности; внесение в почву органического материала (соломы, навоза и пр.) и минеральных удобрений. Оптимальное сочетание агротехнических мероприятий позволяет снизить уровень загрязнения, как правило, на 30–40 %, в основном за счет окисления легко деградируемых компонентов нефти [1]. При этом высокомолекулярные парафины, ароматические и полициклические соединения, содержание которых в сырой нефти колеблется от 20 до 65 %, не разрушаются в течение ряда лет. Данные соединения прочно связываются с почвенными частицами, образуя гидрофобные пленки, и становятся практически недоступными для ферментных систем микроорганизмов. Для повышения биодоступности углеводородных поллютантов используют поверхностно-активные вещества (сурфактанты), которые способствуют десорбции и солюбилизации нефтяных углеводородов, тем самым облегчая их ассимиляцию микробными клетками. Однако, повсеместно применяемые для борьбы с углеводородным загрязнением синтетические сурфактанты – это высокотоксичные вещества с низкой деградируемостью. Применение химических сурфактантов приводит к накоплению экологически опасных соединений в почве. Кроме того, получение синтетических сурфактантов осложнено высокой стоимостью исходного сырья и технологических процессов химического синтеза.

В настоящее время во всем мире интенсивно ведется поиск высокоактивных, экологически безопасных и экономически выгодных сурфактантов микробиологического происхождения. Особенно активно исследования в этом направлении проводятся в США и Канаде [2–4], Германии [5–6]. В России работы по

использованию биосурфактантов в процессах биоремедиации сравнительно немногочисленны и ограничены в основном лабораторными экспериментами [7–9].

В лаборатории алканотрофных микроорганизмов Института экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения РАН получены высокоактивные и экологически безопасные биогенные сурфактанты, продуцируемые штаммами алканотрофных родококков, выделенных из разнообразных природных источников (почва, вода, снег) нефтепромысловых районов Пермского края [10]. Полученные биосурфактантные комплексы, снижающие поверхностное и межфазное натяжение воды до 26,8 и 0,9 мН/м, соответственно, сравнимы по активности с коммерческим препаратом сурфактином, продуцируемым *Bacillus subtilis* [11]. Биосурфактанты бактериального происхождения имеют существенные преимущества перед синтетическими, как то: легкая биodeградебельность, устойчивая активность в экстремальных внешних условиях, широкие функциональные характеристики и возможность получения на нетрадиционных и относительно дешевых источниках сырья. Как показано в экспериментах по отмыванию тяжелой нефти (удельная плотность 0,93–0,97 г/см³) от песка и разделению буровых шламов с помощью биосурфактантных комплексов родококков, степень нефтевосстановления превышает контрольные показатели в 15–20 раз, соответственно [12]. Полученные *Rhodococcus*-биосурфактанты успешно применяются для ускорения естественных процессов биodeградации нефтепродуктов в нефтезагрязненной почве [13–14].

Прогнозное математическое моделирование – эффективный инструмент современной экологической биотехнологии, направленный на адекватное описание и прогнозирование природных процессов в условиях техногенного воздействия. В частности, построение математических моделей позволяет находить оптимальное решение, адекватное описанию процесса загрязнения почв нефтью и нефтепродуктами, прогнозирование последствий нарушения почвенных процессов и выбор оптимальной стратегии биоремедиации. Следует отметить, что очищение почвы от загрязняющих веществ (углеводородов нефти) – процесс комплексный, в котором участвуют физические, химические и биологические факторы. При этом действие всех факторов взаимообусловлено и синергично. Исследование сложных механизмов биоремедиации требует создания математических моделей, отражающих реальные процессы, протекающие в нефтезагрязненной почве под действием биосурфактантов, и используемых для изучения воздействия отдельных факторов на данные процессы.

В данной работе предложена математическая модель нефтеотмывания загрязненного почвогрунта в стационарных условиях под действием *Rhodococcus*-биосурфактанта. Модель основана на теории течения (фильтрации) жидкости через пористые материалы. При построении модели использованы экспериментальные данные по проникновению биосурфактанта в модельной почвенной колонке [15]. Цель исследования – теоретическая оценка основных параметров процесса фильтрации биосурфактанта в нефтезагрязненном почвогрунте и расчет продолжительности процесса нефтеотмывания.

Математическая модель нефтеотмывания

Загрязненный нефтепродуктами почвогрунт находится в резервуаре, имеющем форму прямоугольного параллелепипеда (рис. 1). Грань $z = l_3$ – открытая поверхность; грани $x = 0$, $x = l_1$, $y = 0$, $y = l_2$ и часть $y > l_0$ грани $z = 0$ – непроницаемые

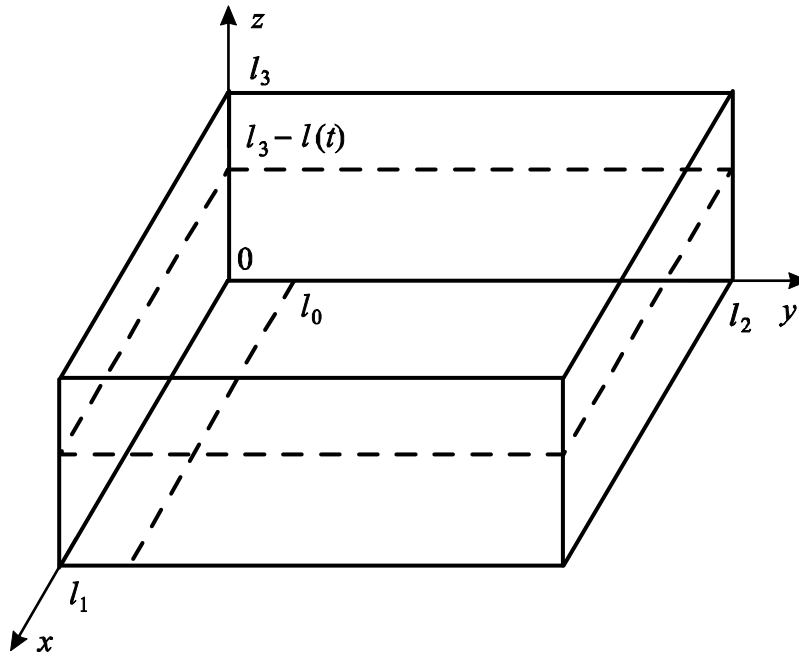


Рис. 1. Модель резервуара с загрязненным почвогрунтом

поверхности; часть $y < l_0$ грани $z = 0$ – труба для откачивания раствора биосурфактанта.

Открытая поверхность $z = l_3$ орошается раствором *Rhodococcus*-биосурфактанта (далее – биосурфактантом). В нефтезагрязненном почвогрунте происходит фильтрация биосурфактанта, осуществляющаяся в два этапа. На первом этапе имеется фронт $z = l_3 - l(t)$ проникновения биосурфактанта. На втором этапе, после достижения биосурфактантом дна резервуара, происходит его откачивание через трубу с помощью вакуумного насоса.

Основной задачей математического моделирования процесса нефтеотмывания является теоретическая оценка продолжительности T отмывания заданного объема почвогрунта заданным объемом биосурфактанта.

Процесс фильтрации описывается уравнениями безынерционного течения идеальной несжимаемой жидкости под действием силы тяжести, объемной силы сопротивления, пропорциональной скорости, и силы сопротивления, сосредоточенной на фронте проникновения и зависящей от скорости [16]:

$$-\frac{1}{\rho} \text{grad } p + \bar{g} - k\bar{V} - f(V) \frac{\bar{V}}{V} \delta(z - (l_3 - l(t))) = 0, \quad (1)$$

$$\text{div } \bar{V} = 0, \quad (2)$$

где $\rho = \alpha \rho_0$ – эффективная плотность биосурфактанта, ρ_0 – плотность “чистого” биосурфактанта, α – пористость почвы, p – давление, \bar{g} – ускорение свободного падения, \bar{V} – поле скоростей частиц жидкости, k и $f(V)$ – коэффициент и функция, определяемые по экспериментальным данным (см. ниже), δ – дельта-функция Дирака (слагаемое, содержащее дельта-функцию, имеется только для первого этапа фильтрации).

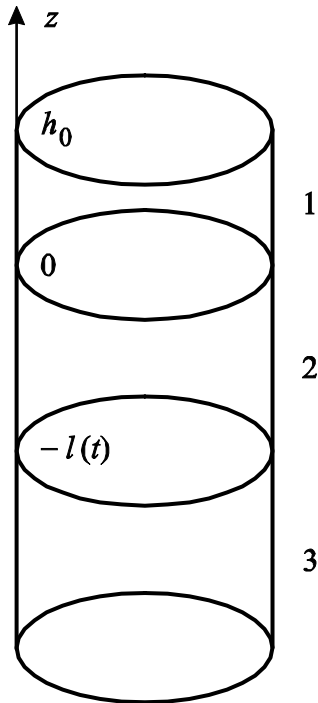


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментальной колонки

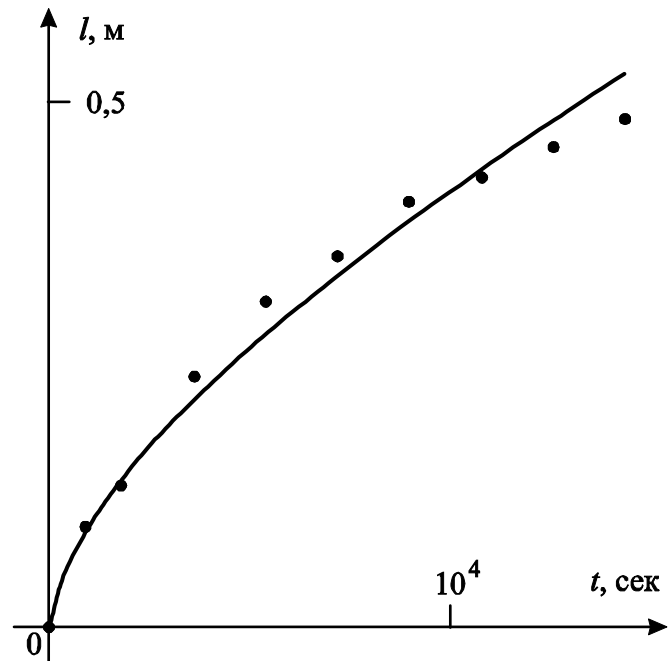


Рис. 3. Экспериментальная зависимость глубины проникновения биосурфактанта от времени и ее теоретическая аппроксимация

На первом этапе фильтрации $p = p(z, t)$, $V_x = V_y = 0$, $V_z = -V(z, t)$; при этом $l_3 - l(t) \leq z \leq l_3$, а $p(z, t)$, $V(z, t)$, $l(t)$ подлежат определению. Из (2) следует, что $V(z, t) = V(t)$; тогда из (1) находим:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p(z, t)}{\partial z} - g + kV(t) + f(V(t))\delta(z - (l_3 - l(t))) = 0.$$

Интегрируя это равенство по z от $l_3 - l(t)$ до l_3 и учитывая, что $p(l_3, t) = p_0 + \rho_0 g h_0$, $p(l_3 - l(t), t) = p_0$, $V(t) = dl(t)/dt$, где p_0 – атмосферное давление, h_0 – толщина слоя биосурфактанта на открытой поверхности почвогрунта, получим:

$$\frac{g h_0}{\alpha} + \left(g - k \frac{dl(t)}{dt} \right) l(t) - f\left(\frac{dl(t)}{dt} \right) = 0. \quad (3)$$

Для определения k и $f(V)$ использовались данные экспериментального определения параметров процесса вертикальной фильтрации биосурфактанта в модельной почвенной колонке, схематично представленной на рис. 2. На данном рисунке область 1 ($0 < z < h_0$) – слой “чистого” биосурфактанта, $z = 0$ – поверхность почвогрунта, область 2 ($-l(t) < z < 0$) – загрязненный почвогрунт и проникший биосурфактант, область 3 ($z < -l(t)$) – только загрязненный почвогрунт. Экспериментально измеренная зависимость $l(t)$ показана точками на рис. 3. Если $f(V) = 0$, то из (3) с учетом условия $l(0) = 0$ следует, что

$$l - \frac{h_0}{\alpha} \ln \left(1 + \frac{\alpha l}{h_0} \right) = \frac{gt}{k}. \quad (4)$$

Однако практика показывает, что $f(V) \neq 0$, так как после прохождения фронта последующие порции биосурфактанта фильтруются через почвогрунт значительно быстрее. Аппроксимируем экспериментальную зависимость (рис. 3) теоретической формулой, подобной (4):

$$l - \frac{a}{b} \ln(1 + bl) = ct, \quad (5)$$

где a, b, c – подгоночные параметры. Соответствующая теоретическая кривая показана на рис. 3 (численные значения параметров a, b, c приведены ниже). Из (3) и (5) (эту формулу следует продифференцировать, чтобы выразить l через V) находим

$$f(V) = \frac{gh_0}{\alpha} + \frac{(g - kV)(c - (1 - a)V)}{b(V - c)}.$$

Из (5) также следует, что $c < V \leq c/(1 - a)$. В качестве значения коэффициента k выбиралось наибольшее число, при котором функция $f(V)$ монотонна в этой области (численное значение k приведено ниже). Продолжительность T_1 первого этапа фильтрации находим из (5):

$$T_1 = \frac{l_3}{c} - \frac{a}{bc} \ln(1 + bl_3).$$

Объем биосурфактанта, использованного на первом этапе фильтрации,

$$v_1 = \alpha l_1 l_2 l_3. \quad (6)$$

На втором этапе фильтрации фронт проникновения исчезает и содержащее дельта-функцию слагаемое в (1) должно быть опущено. Тогда из (1) и (2) получаем, что

$$\Delta p(x, y, z) = 0, \quad (7)$$

где Δ – оператор Лапласа. Из (1) также находим краевые условия для давления на границе резервуара:

$$\left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=l_1} = \left. \frac{\partial p}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial p}{\partial y} \right|_{y=l_2} = 0, \quad \left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{z=0} = -\rho g \quad \text{при } y > l_0. \quad (8)$$

Так как на открытой поверхности резервуара имеется слой биосурфактанта толщиной h_0 , а откачивание биосурфактанта производится вакуумным насосом, то

$$p|_{z=l_3} = p_0 + \rho_0 gh_0, \quad (9)$$

$$p|_{z=0} = 0 \quad \text{при } y < l_0.$$

Последнее условие заменим приближенным условием

$$\left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{z=0} = \rho(kU - g) \quad \text{при } y < l_0, \quad (10)$$

где U следует найти из соотношения

$$\int_0^{l_1} \int_0^{l_0} p(x, y, 0) dx dy = 0. \quad (11)$$

Величина U есть средняя (по области $0 < x < l_1$, $0 < y < l_0$) скорость откачивания биосурфактанта. Решение уравнения (7) с дополнительными условиями (8–11) было построено методом разделения переменных [17] (p не зависит от x):

$$p(y, z) = p_0 + \rho_0 g h_0 + \rho \left(g - \frac{kUl_0}{l_2} \right) (l_3 - z) - \frac{2\rho kUl_2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin \frac{\pi n l_0}{l_2}}{n^2 \operatorname{ch} \frac{\pi n l_3}{l_2}} \operatorname{sh} \frac{\pi n (l_3 - z)}{l_2} \cos \frac{\pi n y}{l_2},$$

где

$$U = \frac{\frac{g}{k} + \frac{1}{kl_3} \left(\frac{p_0}{\rho} + \frac{gh_0}{\alpha} \right)}{\frac{l_0}{l_2} + \frac{2l_2^2}{\pi^3 l_0 l_3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^3} \sin^2 \frac{\pi n l_0}{l_2} \operatorname{th} \frac{\pi n l_3}{l_2}}.$$

Если на втором этапе фильтрации использован объем v_2 биосурфактанта, то продолжительность этого этапа равна $T_2 = \frac{v_2}{\alpha Ul_1 l_0}$. Общий использованный объем

биосурфактанта обычно выражается в единицах объема резервуара: $v_1 + v_2 = N l_1 l_2 l_3$, где N – заданное число. Тогда, с учетом (6), находим продолжительность второго этапа фильтрации $T_2 = \frac{l_2 l_3 (N - \alpha)}{\alpha Ul_0}$. Общая продолжительность нефтеотмывания $T = T_1 + T_2$.

При численном нахождении T принимались следующие значения задаваемых величин: $l_0 = 0,5$ м; значение l_1 несущественно (так как T не зависит от l_1); $l_2 = 20$ м; $l_3 = 3,5$ м; $\rho_0 = 10^3$ кг/м³; $\alpha = 0,5$; $h_0 = 0,1$ м; $N = 3$. Найдены следующие значения вычисляемых величин: $a = 0,95$; $b = 2,7$ 1/м; $c = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м/сек; $k = 3,3 \cdot 10^4$ 1/сек; $T_1 = 2,1$ суток; $U = 7,5 \cdot 10^{-3}$ м/сек; $T_2 = 1,1$ суток; $T = 3,2$ суток. Теоретически рассчитанные значения исследуемых параметров (U , T_1 , T_2 , T) согласуются с экспериментальными данными, полученными другими исследователями [3–4].

Следовательно, предложенная математическая модель качественно верно описывает стационарный процесс нефтеотмывания загрязненного почвогрунта под действием биосурфактанта. Адекватное количественное описание данного процесса требует дальнейшего исследования; для этого необходима постановка дополнительных полевых экспериментов с целью получения достаточно большого объема экспериментальных данных.

Заключение

Построена математическая модель стационарного процесса нефтеотмывания загрязненного почвогрунта под действием *Rhodococcus*-биосурфактанта. Предложенная модель, основанная на теории фильтрации, обобщает результаты лабораторного колоночного эксперимента по просачиванию биосурфактанта через нефтезагрязненную почву. С помощью разработанной модели предложено адекватное прогнозирование промышленного процесса отмывания загрязненного почвогрунта в полевых условиях. Получена теоретическая оценка основных рабочих параметров и эффективности (продолжительности) процесса нефтеотмывания, качественно совпадающая с известными экспериментальными оценками. Дальнейшее развитие предложенной математической модели выражается в количественном описании исследуемого процесса на основе дополнительных экспериментальных исследований.

Благодарность

Исследования частично поддержаны грантами Программы Президиума РАН “Молекулярная и клеточная биология” и РФФИ № 04-04-97518-р_офи.

Список литературы

1. *Christofi, N.* Biological treatment of crude oil contaminated soil in Russia / N. Christofi, I.B. Ivshina, M.S. Kuyukina, J.C. Philp // Contaminated Land and Groundwater: Future Directions / Ed. D.N. Lerner and N.R.G. London, Geological Society Engineering Geology Publications. – 1998. – Vol. 14. – P. 45-51.
2. *Herman, D.C.* Rhamnolipid (biosurfactant) effects on cell aggregation and biodegradation of residual hexadecane under saturated flow conditions / D.C. Herman, Y. Zhang, R. M. Miller // Appl. Environ. Microbiol. – 1997. – Vol. 63. – P. 3622-3627.
3. *Kosaric, N.* Biosurfactants for soil bioremediation / N. Kosaric // Food Technol. Biotechnol. – 2001. – Vol. 39. – P. 295-304.
4. *Mulligan, C.N.* Surfactant-enhanced remediation of contaminated soil: a review / C.N. Mulligan, R.N. Yong, B.F. Gibbs // Engineering Geology. – 2001. – Vol. 60. – P. 371-380.
5. *Yakimov, M.M.* Characterisation of a new lipopeptide surfactant produced by a thermotolerant and halotolerant subsurface *Bacillus licheniformis* BAS50 / M.M. Yakimov, K.N. Timmis, V. Wray, H.L. Fredrickson // Appl. Environ. Microbiol. – 1995. – Vol. 61, No. 5. – P. 701-713.
6. *Lang, S.* Biological amphiphiles (microbial biosurfactants) / S. Lang // Curr. Opin. Colloid Interface Sci. – 2002. – Vol. 7. – P. 12-20.
7. *Елисеев, С.А.* Нефтеотмывающий биоэмульгатор, образуемый *Bacillus* species / С.А. Елисеев, Р.И. Вильданова-Марцишин, А.Н. Шульга, З.В. Шабо, А.А. Туровский // Микробиол. журн. – 1991. – Т. 53, № 6. – С. 61-66.
8. *Турковская, О.В.* Штамм *Pseudomonas aeruginosa* – продуцент биоПАВ / О.В. Турковская, Т.В. Дмитриева, А.Ю. Муратова // Прикл. биохим. микробиол. – 2001. – Т. 37, № 1. – С. 80-85.
9. *Пирог, Т.П.* Образование поверхностно-активных веществ при росте штамма *Rhodococcus erythropolis* ЭК-1 на гидрофильных и гидрофобных субстратах / Т.П. Пирог, Т.А. Шевчук, И.Н. Волошина, Е.В. Карпенко // Прикл. биохим. микробиол. – 2004. – Т. 40, № 5. – С. 544-550.
10. *Ившина, И.Б.* Бактерии рода *Rhodococcus* (иммунодиагностика, детекция, биоразнообразие) / И.Б. Ившина: автореф. дис...д-ра биол. наук. – Пермь, – 1997.
11. *Kuyukina, M.S.* Recovery of *Rhodococcus* biosurfactants using methyl-tertiary butyl ether extraction / M.S. Kuyukina, I.B. Ivshina, J.C. Philp, N. Christofi, S.A. Dunbar, M.I. Ritchkova // J. Microbiol. Methods. – 2001. – Vol. 46. – P. 149-156.
12. *Ivshina, I.B.* Oil desorption from mineral and organic materials using biosurfactant complexes produced by *Rhodococcus* species / I.B. Ivshina, M.S. Kuyukina, J.C. Philp, N. Christofi // World J. Microbiol. Biotechnol. – 1998. – Vol. 14. – P. 711-717.

13. *Ившина, И.Б.* Применение экологически безопасной экспресс-технологии очистки нефтезагрязненных почв и грунтов (на примере районов нефтедобычи Пермской области) / И.Б. Ившина, М.С. Куюкина, С.М. Костарев // Нефтяное хозяйство. – 2003. – № 9. – С. 116-118.
14. *Куюкина, М.С.* Bioremediation of crude oil-contaminated soil using slurry-phase biological treatment and land farming techniques / M.S. Kuyukina, I.B. Ivshina, M.I. Ritchkova, J.C. Philp, J.C. Cunningham, N. Christofi // Soil Sediment Contamination. – 2003. – Vol. 12. – P. 85-99.
15. *Куюкина, М.С.* Effect of biosurfactants on crude oil desorption and mobilization in a soil system / M.S. Kuyukina, I.B. Ivshina, S.O. Makarov, L.V. Litvinenko, C.J. Cunningham, J.C. Philp // Environ. Int. – 2005. – Vol. 31. – P. 155-161.
16. *Коллинз, Р.* Течения жидкостей через пористые материалы / Р. Коллинз. – М.: Мир, 1964.
17. *Тихонов, А.Н.* Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Изд-во МГУ, 1999.

MATHEMATICAL MODELLING OF OIL-CONTAMINATED SOIL WASHING PROCESS USING RHODOCOCCLUS-BIOSURFACTANT

**M.S. Kuyukina, I.B. Ivshina, M.A. Osipenko, Y.I. Nyashin, O.A. Korostina
(Perm, Russia)**

Crude oil extraction and transport are inevitably accompanied by environmental contamination. In recent years methods of biological remediation of oil-contaminated soils gain increasing popularity due to their environmental safety. Effective and ecologically safe bacterial surfactants produced by alkanotrophic *Rhodococcus* strains which were isolated from oil-extraction areas in Perm region were developed in the Laboratory of Alkanotrophic Microorganisms, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. The biosurfactants produced are successfully applied in ex/in situ technologies of oil-contaminated soil bioremediation. Since soil bioremediation is an extremely complex process involving physical, chemical and biological factors there is an obvious need for appropriate mathematical model adequately describing effects of various factors (e.g. biosurfactant) on this process. In the present study mathematical model of oil-contaminated soil washing process using *Rhodococcus*-biosurfactant is developed which allows estimation of field-scale oil washing efficiency on the base of laboratory data on biosurfactant filtration through oil-contaminated soil column. Theoretically estimated oil washing parameters are in qualitative agreement with known field experimental data.

Key words: oil-contaminated soil, bioremediation, oil washing, *Rhodococcus*-biosurfactant, mathematical modelling, filtration theory.

Получено 16 января 2006