

**Е.В. Феоктистова, М.С. Куюкина, М.А. Осипенко**  
**E.V. Feoktistova, M.S. Kuyukina, M.A. Osipenko**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
Perm National Research Polytechnic University

## **БИОМЕХАНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕЖФАЗНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ БАКТЕРИИ – ВОДА – УГЛЕВОДОРОД**

### **BIOMECHANICAL MODEL OF INTERFACIAL PROCESSES IN THE SYSTEM BACTERIA–WATER–HYDROCARBON**

Рассмотрены поверхностные явления на межфазной границе, разделяющей клеточную суспензию бактерий рода *Rhodococcus* и жидкий углеводород. Проведено детерминистическое и вероятностное моделирование временной зависимости коэффициента поверхностного натяжения. Нестабильный характер зависимости объяснен случайными изменениями степени образования единой пленки бактерий.

The surface phenomena on the interface dividing the suspension of *Rhodococcus* cells and the liquid hydrocarbon are considered. The deterministic and the stochastic modelling of the time dependence of surface tension coefficient are carried out. The instability of this dependence is explained by the random variations of the degree of the formation of entire film of cells.

**Ключевые слова:** бактериальные клетки, *Rhodococcus*, поверхностное натяжение, детерминистическая модель, вероятностная модель.

**Keywords:** bacterial cells, *Rhodococcus*, surface tension, deterministic model, stochastic model.

Актинобактерии рода *Rhodococcus* (рис. 1) являются представителями эколого-трофической группы микроорганизмов, окисляющих природные и антропогенные углеводороды и, следовательно, участвующих в различных биогеохимических процессах и формировании безуглеводородной биосферы [1].

Родококки способны к окислению углеводородов нефти, смол, фенольных и полихлорированных соединений, гумусовых веществ, лигнина и его производных, восков, пестицидов и др. Некоторые родококки способны усваивать непредельные углеводородные соединения, например ацетилен и пропен, а также ароматические – фенолы, хлорфенолы, ароматические углеводороды нефти.

Реализация биотехнологического потенциала родококков предусматривает всестороннее изучение механизмов их адгезии к различным веществам. В частности, в лаборатории алканотрофных микроорганизмов Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН изучаются закономерности адгезии клеток родококков к жидким алканам. Межфазное натяжение на грани-

це раздела клеточной суспензии и углеводорода измеряется с помощью установки Sigma 701.

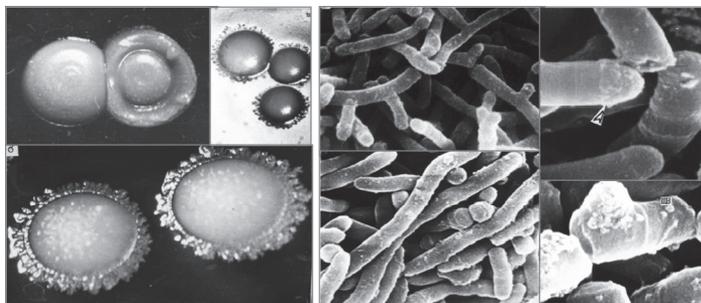


Рис. 1. Колонии (а) и клетки (б) актинобактерий рода *Rhodococcus*

**Анализ экспериментальных данных.** На рис. 2 представлены результаты долгосрочных экспериментов по изучению динамики межфазного натяжения различных концентраций клеток в системе вода-*n*-гексадекан. Установлено, что после 6 ч взаимодействия клеток с *n*-гексадеканом наблюдается скачкообразный характер кривой межфазного натяжения при средних (0,75–1,0) значениях оптической плотности  $ОП_{600\text{нм}}$  ( $ОП$  – безразмерная величина, характеризующая степень погашения света, прошедшего через слой материала), что, по-видимому, свидетельствует о постепенной стабилизации процесса адсорбции клеток в межфазном слое. При определении показателей межфазного натяжения клеточной суспензии в концентрации  $ОП_{600\text{нм}} = 1,25$  стабильных значений в течение 8 ч эксперимента зафиксировать не удалось.

Установлено, что после 9 ч взаимодействия клеток с *n*-гексадеканом показатели межфазного натяжения приобретают стабильный характер (28–29 мН/м), что говорит о предельном насыщении межфазного слоя клетками родококков и образовании межклеточных контактов.

Для исследования влияния природы гидрофобного субстрата на динамику процесса адгезии клеток в двухфазной системе была проведена серия экспериментов с *n*-додеканом (рис. 3), обладающим меньшей гидрофобностью, чем *n*-гексадекан, и, соответственно, большей растворимостью в воде.

В результате проведенных исследований показано, что углеводородный субстрат оказывает влияние на динамику межфазного натяжения. Как видно из рис. 3, в системе с *n*-додеканом к 19 ч эксперимента показатели межфазного натяжения достигают постоянной величины (27 мН/м) уже при минимальной концентрации клеточной суспензии ( $ОП_{600\text{нм}} = 0,25$ ). Интересно, что при использовании суспензии клеток с концентрацией  $ОП_{600\text{нм}} = 0,5$ , стабильных показателей межфазного натяжения зафиксировать не удалось, т.е. данная концентрация клеток является переходной к стабильной системе. Следует отметить, что стабильные показатели межфазного натяжения регистрируются уже при средней концентрации клеток ( $ОП_{600\text{нм}} = 1,25$ ).

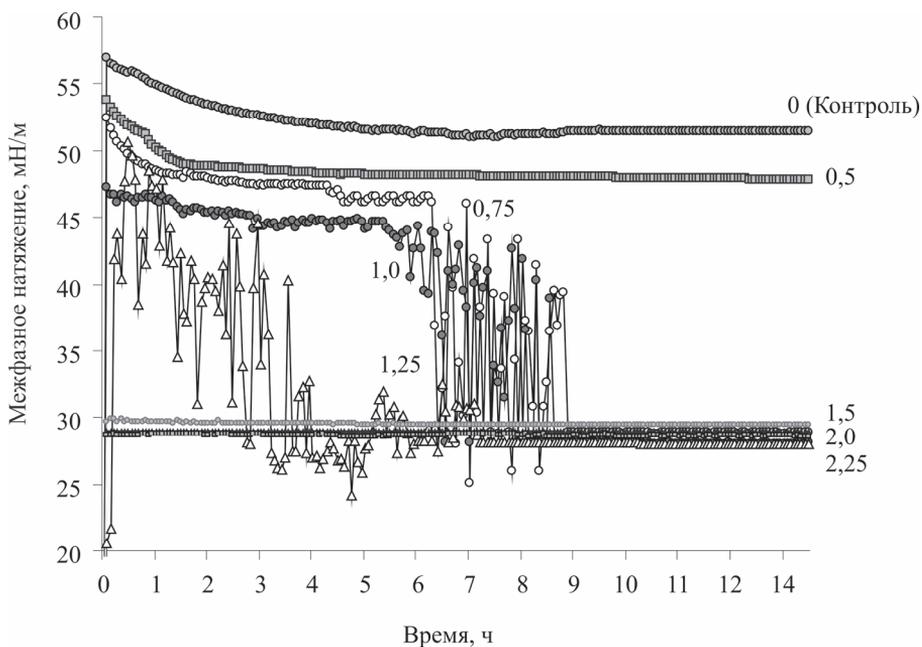


Рис. 2. Динамика межфазного натяжения суспензии клеток *Rhodococcus ruber* ИЭГМ 231 в системе вода-*n*-гексадекан. ОП<sub>600нм</sub> клеточных суспензий: 0; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 2,0; 2,25

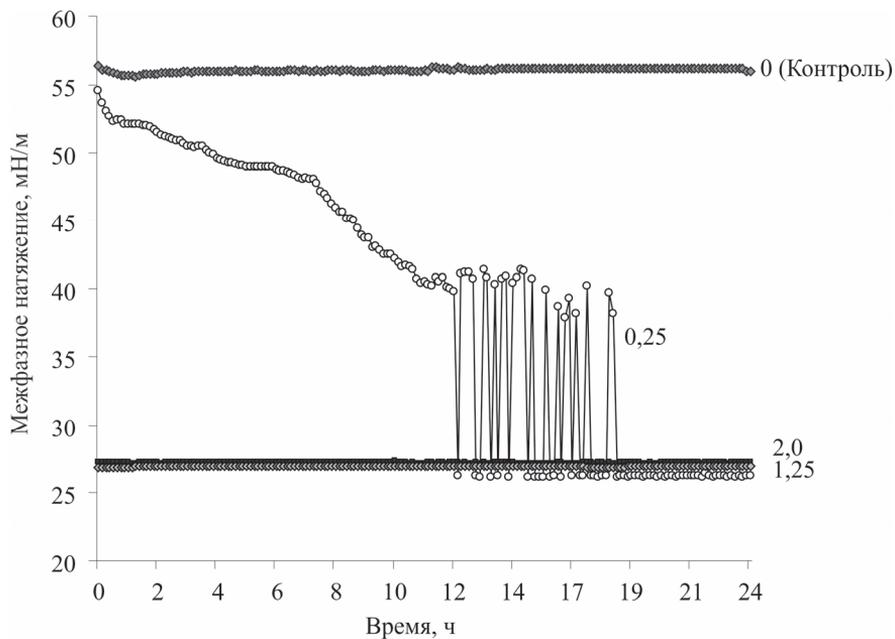


Рис. 3. Динамика межфазного натяжения суспензии клеток *Rhodococcus ruber* ИЭГМ 231 в системе вода-*n*-додекан. ОП<sub>600нм</sub> клеточных суспензий: 0; 0,25; 1,25; 2,0

Полученные результаты свидетельствуют о том, что инициация формирования биопленки в системе вода-*n*-додекан начинается при меньших концентрациях клеточной суспензии, что, по-видимому, обусловлено термодинамическими свойствами системы с додеканом. Вероятно, площадь раздела фаз возрастает с увеличением дисперсности системы, поэтому площадь контакта клеток с *n*-додеканом увеличивается и клетки родококков за более короткое время адсорбируются на доступной поверхности. Замечено, что стабильные показатели межфазного натяжения клеточной суспензии одинаковы (29–27 мН/м) независимо от природы гидрофобного субстрата.

Полученные данные о корреляционной зависимости показателей межфазного натяжения от концентрации клеток в суспензии свидетельствуют, что родококки на границе раздела фаз вода – углеводород проявляют свойства поверхностно-активных частиц [2]. Следует отметить, что бактериальные клетки, используемые в эксперименте, предварительно были отмыты от богатой питательной среды, поэтому участие *Rhodococcus*-биосурфактантов в данном процессе исключается. Таким образом, снижение показателей поверхностного и межфазного натяжения обусловлено участием гидрофобных взаимодействий между бактериальными клетками и углеводородом. Полученные данные могут быть использованы для регуляции роста бактериальных биопленок в жидких гетерофазных системах.

**Детерминистическая биомеханическая модель временной зависимости поверхностного натяжения.** Пусть  $n$  – концентрация клеток на межфазной границе,  $t$  – время. Будем считать, что

$$n = n_1 (1 - \exp(-t/t_1)),$$

$$\sigma(n) = \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_1(s(n)))n/n_1,$$

где  $n_1$  – предельная концентрация;  $t_1$  – «характерное время»;  $\sigma$  – межфазное (поверхностное) натяжение,

$$\sigma_1(s) = \sigma_{10} - (\sigma_{10} - \sigma_{11})s,$$

$0 \leq s \leq 1$  – степень образования единой пленки [3–5] на межфазной границе;  $\sigma_0$ ,  $\sigma_{10}$ ,  $\sigma_{11}$  – «характерные» значения  $\sigma$ . Зависимость  $s$  от  $n$  определяется следующей феноменологической формулой:

$$s(n) = 1/2 + (1/\pi) \operatorname{arctg}((n - n_2)/n_3),$$

где  $n_2$ ,  $n_3$  – «характерные» значения  $n$ .

Сравнивая предлагаемую теоретическую зависимость  $\sigma(t)$  с соответствующей экспериментальной зависимостью при  $\text{ОП}_{600\text{нм}} = 0,75$ , находим  $t_1$ ,  $\sigma_0$ ,

$\sigma_{10}$ ,  $\sigma_{11}$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ , обеспечивающие наилучшее совпадение без учета случайных вариаций экспериментальной зависимости (рис. 4).

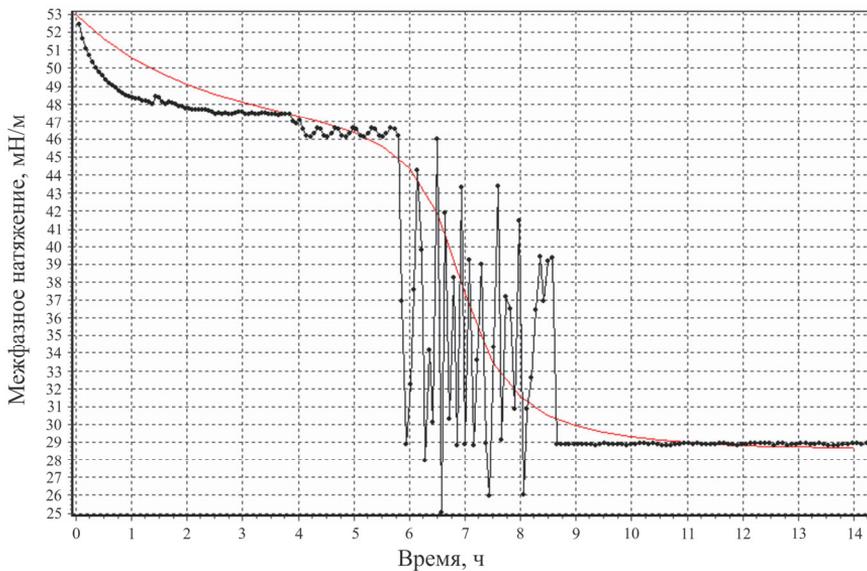


Рис. 4. Экспериментальная зависимость  $\sigma(t)$  ( $OP_{600nm} = 0,75$ ) и соответствующая теоретическая зависимость, не учитывающая случайных вариаций (плавная линия)

**Вероятностная биомеханическая модель временной зависимости поверхностного натяжения.** Вероятностная модель учитывает случайный характер процесса образования единой пленки бактерий. Пусть степень образования этой пленки есть случайная величина  $\xi(n)$ , равномерно распределенная на отрезке  $[s(n) - \Delta(n), s(n) + \Delta(n)]$ , где

$$\Delta(n) = k(n) \min(s, 1 - s),$$

а  $k(n)$  находится из условия наилучшего (качественного) совпадения) экспериментальной и теоретической зависимостей  $\sigma(n)$ :

$$k(n) = \begin{cases} 1,7(n < 0,985), \\ 0(n \geq 0,985). \end{cases}$$

Сравнивая предлагаемую теперь случайную теоретическую зависимость  $\sigma(t)$  с соответствующей экспериментальной зависимостью при  $OP_{600nm} = 0,75$ , находим  $t_1$ ,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_{10}$ ,  $\sigma_{11}$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ , обеспечивающие наилучшее совпадение с учетом случайных вариаций экспериментальной зависимости. Сопоставление

теоретической (линия без точек) и экспериментальной зависимостей представлено на рис. 5.

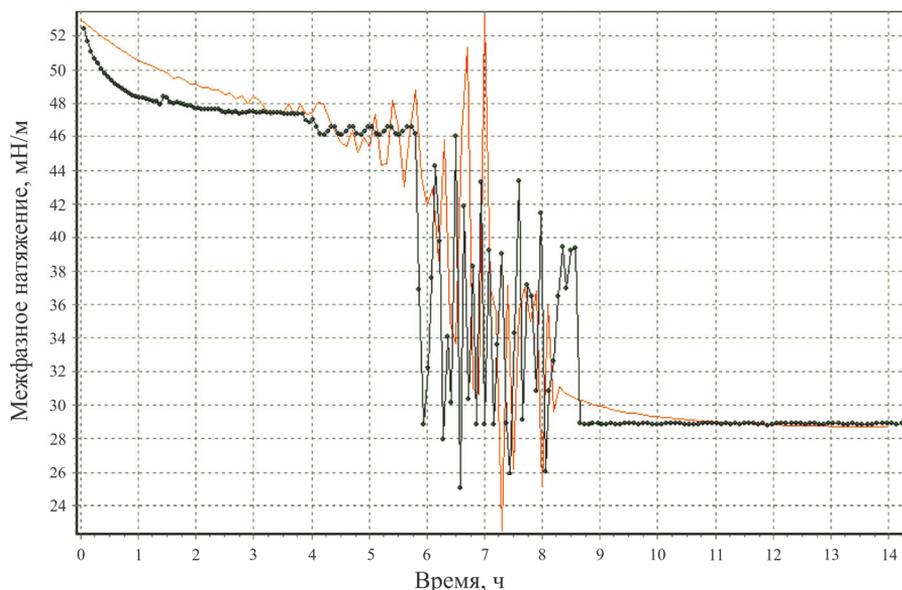


Рис. 5. Экспериментальная зависимость  $\sigma(t)$  ( $OP_{600nm} = 0,75$ ) и соответствующая теоретическая зависимость, учитывающая случайные вариации

Сделаем следующие выводы. Экспериментально наблюдаемая зависимость межфазного натяжения в системе бактерии – вода – углеводород от времени носит сложный и нерегулярный характер. Детерминистическая модель может лишь качественно описать эту зависимость. Более точное соответствие между теорией и экспериментом может быть достигнуто только с помощью разработанной вероятностной модели. Эта модель качественно и количественно описывает основные черты рассматриваемого явления. Однако некоторые теоретические зависимости, содержащиеся в модели, являются феноменологическими, т.е. не выводятся из детального анализа механизма их возникновения. Модель допускает дальнейшее свое развитие, которое должно состоять в подробном анализе механизмов поведения бактериальных клеток на границе раздела фаз.

### Список литературы

1. Ившина И.Б., Пшеничных Р.А., Оборин А.А. Пропаноксиляющие родококки / Академия наук СССР, Урал. науч. центр. – Свердловск, 1987. – 125 с.

2. Николаев Ю.А., Плакунов В.К. Биопленка – «город микробов» или аналог многоклеточного организма? // Микробиология. – 2007. – Т. 76, № 2. – С. 149–163.

3. Mechanical properties of hexadecane–water interfaces with adsorbed hydrophobic bacteria / Z. Kang, A. Yeung, J.M. Foght, M.R. Gray // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. – 2008. – Vol. 62. – P. 273–279.

4. Hydrophobic bacteria at the hexadecane–water interface: examination of micrometre scale interfacial properties / Z. Kang, A. Yeung, J.M. Foght, M.R. Gray // Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. – 2008. – Vol. 67. – P. 59–66.

5. Behavior of *Marinobacter hydrocarbonoclasticus* CP17 cells during initiation of biofilm formation at the alkane–water interface / B. Klein, P. Bouriat, P. Goulas, R. Grimaud // Biotechnology and Bioengineering. – 2010. – Vol. 105, no. 3. – P. 461–468.

Получено 1.09.2014

**Феоктистова Екатерина Валерьевна** – магистрант, ПНИПУ, ФПММ, гр. БМ-13-1м, e-mail: [ekaterina\\_feoktistova@bk.ru](mailto:ekaterina_feoktistova@bk.ru).

**Куюкина Мария Станиславовна** – доктор биологических наук, профессор, ПНИПУ, ведущий научный сотрудник Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, e-mail: [kuukina@iegm.ru](mailto:kuukina@iegm.ru).

**Осипенко Михаил Анатольевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, ПНИПУ, e-mail: [oma@theormech.pstu.ac.ru](mailto:oma@theormech.pstu.ac.ru).