

УДК 579.26

Е.В. Феоктистова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АДсорбции
БАКТЕРИАЛЬНЫХ КЛЕТОК НА МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЕ
ВОДА – БАКТЕРИИ – УГЛЕВОДОРОД**

Рассматривается математическая модель формирования пленки бактерий рода *Rhodococcus* на границе раздела клеточной суспензии и жидкого углеводорода. Это формирование приводит к своеобразной временной зависимости межфазного натяжения, когда на ряду с участками плавного снижения имеется участок нерегулярной зависимости. В модели с использованием метода Монте-Карло эта зависимость объясняется на основе предположений о накоплении клеток на межфазной границе, об образовании единого кластера клеток и случайном разрушении его измерительным прибором.

Ключевые слова: *Rhodococcus*, бактериальная пленка, межфазное натяжение, кластер, математическая модель, метод Монте-Карло.

E.V. Feoktistova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**THE MATHEMATICAL MODEL OF BACTERIAL CELLS
ADSORPTION AT THE WATER – BACTERIA – HYDROCARBONS
INTERFACE**

A mathematical model of the bacteria of the genus *Rhodococcus* film at the interface of the cell suspension and liquid hydrocarbons is considered. The formation leads to the time-dependence of interfacial tension, where sections with soft reduction exist as well as section with irregular dependence. In the model, using the Monte Carlo method, this dependence is explained on the basis of assumptions about the accumulation of cells at the interface, the formation of a single cluster of cells, and accidentally breaking his instrument.

Keywords: *Rhodococcus*, bacterial film, interfacial tension, cluster, mathematical model, Monte-Carlo method.

Актинобактерии рода *Rhodococcus* являются представителями группы микроорганизмов, окисляющих природные и антропогенные углеводороды и, следовательно, участвующих в различных биогеохимических процессах и формировании углеводородной атмосферы Земли [1].

Бактерии рода *Rhodococcus* способны к окислению углеводов нефти, смол, фенольных и полихлорированных соединений, гумусовых веществ, лигнина и его производных, восков, пестицидов и др. Некоторые родококки способны усваивать неопределяемые углеводородные соединения. Отдельные виды родококков, обладающие способностью ассимилировать в качестве единственного источника питания газообразные углеводороды, являются важным компонентом «бактериального фильтра» районов углеводородных скоплений. Они также находят широкое применение в качестве чувствительных индикаторных организмов при поиске газовых и нефтяных месторождений [1]. Способность родококков разлагать различные ксенобиотики эффективно используется в природоохранных целях; на основе представителей рода *Rhodococcus spp.* создаются различные биопрепараты для биоремедиации земель и воды [2].

Реализация биотехнологического потенциала родококков предусматривает всестороннее изучение механизмов их адгезии к различным веществам. При этом характерным явлением, которое в настоящее время интенсивно исследуется, оказывается формирование биопленок [3], в особенности на границе раздела жидких фаз [4–6]. В частности, в лаборатории алканотрофных микроорганизмов Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН (г. Пермь) изучаются закономерности адгезии клеток родококков к жидким *n*-алканам. С помощью установки Sigma 701 проведен эксперимент по измерению методом отрыва кольца межфазного натяжения в системе «*n*-гексадекан – клеточная суспензия *R. ruber* ИЭГМ 123». Эксперимент показывает, что с течением времени межфазное натяжение в среднем уменьшается (за счет адгезии клеток к межфазной границе), но в определенном временном интервале его изменение имеет случайный, быстроосциллирующий характер.

Построена математическая модель, объясняющая эту своеобразную зависимость. По мере накопления клеток на межфазной границе межфазное натяжение постепенно уменьшается, причем процесс его измерения с помощью кольца не оказывает влияния на структуру скопления граничных клеток. При достаточно большой концентрации возникают качественно новые явления. Во-первых, за счет межклеточного взаимодействия формируются клеточные кластеры, которые при некотором критическом значении концентрации объединяются в один кластер (рис. 1). Это приводит к быстрому снижению межфазного на-

тяжения. Во-вторых, измерительное кольцо при каждом измерении случайным образом разрушает этот кластер (рис. 2). В отсутствие измерений межфазное натяжение снижалось бы плавно. При наличии упомянутого случайного разрушения межфазное натяжение меняется случайно и скачкообразно. При дальнейшем увеличении концентрации кольцо уже не может разрушить кластер, и возобновляется плавное снижение межфазного натяжения.

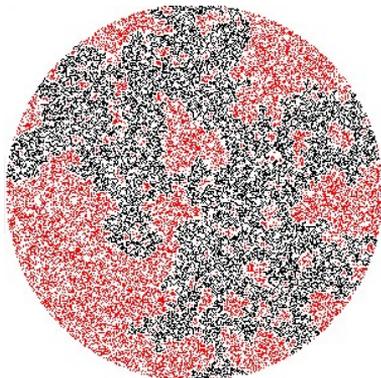


Рис. 1. Бактерии рода *Rhodococcus* и наибольший кластер (выделен черным цветом)

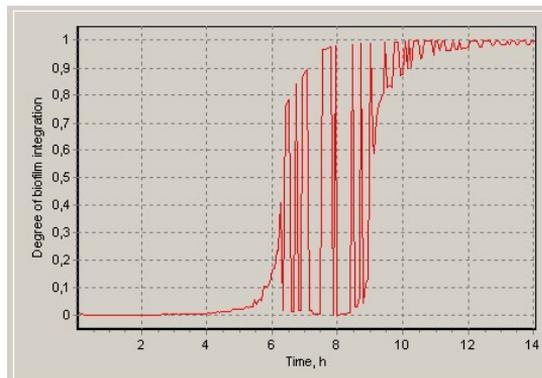


Рис. 2. График разрушения наибольшего кластера кольцом измерения

Практически моделирование указанных случайных процессов проводилось методом Монте-Карло. Полученная математическая зависимость полностью соответствует имеющимся экспериментальным данным. Дальнейшее развитие модели должно состоять из уточнений механизма межклеточного взаимодействия, приводящего к образованию кластеров.

Исследования поддержаны грантами НШ-5589.2012.4 и Программой МКБ 12-П-4-1052.

Список литературы

1. Ившина И.Б., Пшеничнов Р.А., Оборин А.А. Пропанокисляющие родококки. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1987. – 125 с.
2. Kuykina M.S., Ivshina I.B. Application of *Rhodococcus* in bioremediation of contaminated environments // Microbiology Monographs / Ed. A. Steinbuchel. – Dordrecht; London; New York: Springer-Verlag, 2010. – Vol. 16. – P. 231–262.

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

4. 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.

5. 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.

6. 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.

References

1. Ivshina I.B., Pshenichnov R.A., Oborin A.A. Propanokisliaiushchie rodokokki [Propane oxidizing Rhodococcus]. Sverdlovsk: Ural'skii nauchnyi tsentr Akademii nauk USSR, 1987. 125 p.

2. Kuykina M.S., Ivshina I.B. Application of Rhodococcus in bioremediation of contaminated environments. *Microbiology Monographs*. Dordrecht, London, New York: Springer-Verlag, 2010, vol. 16, pp. 231-262.

3. Nikolaev Iu.A., Plakunov V.K. Bioplenka – «gorod mikrobov» ili analog mnogokletochnogo organizma? [Biofilm – the "city of germs" or equivalent multicellular organism?]. *Mikrobiologiya*, 2007, vol. 76, no. 2, pp. 149-163.

4. Kang Z., Yeung A., Foght J.M., Gray M.R. Mechanical properties of hexadecane – water interfaces with adsorbed hydrophobic bacteria. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2008, no. 62, pp. 273-279.

5. Kang Z., Yeung A., Foght J.M., Gray M.R. Hydrophobic bacteria at the hexadecane – water interface: examination of micrometre scale interfacial properties. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2008, no. 67, pp. 59-66.

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

Получено 10.11.2015

Об авторе

Феоктистова Екатерина Валерьевна (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ekaterina_feoktistova@bk.ru).

About the author

Ekaterina V. Feoktistova (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ekaterina_feoktistova@bk.ru).