

# БЫСТРАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ САХАРОВ В ПЧЕЛИНОМ МЕДЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАНОСЕКУНДНЫХ МИКРОРАЗРЯДОВ

А. Е. Дубинов, Ю. П. Кожяева, И. Л. Львов, С. А. Садовой, В. Д. Селемир, Д. В. Вялых

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В данной работе изучались наносекундные электрические микроразряды в жидком пчелином меде. Воздействию подвергался натуральный пчелиный мед российской фирмы Medovaya Dolina LLC, находящийся в жидком состоянии. Мед представляет собой сильно перенасыщенный раствор природных сахаров в воде. В результате воздействия микроразрядами на мед, в нем были обнаружены усы кристаллов сахаров. Изучалась динамика рождения и роста кристаллов сахаров.

## Введение

Импульсные электрические разряды в жидкостях исследуются уже много лет. В этой области накоплен обширный фактический материал, написано много диссертаций, обзоров [1–3] и книг [4, 5]. Развито множество технологий, которые используют разряды в жидкостях, например, очистка [6] и стерилизация жидкостей [7], изменение их окраски [8], разрушение живых тканей в медицине [9] и др. Разряды изучались как в слабвязких жидкостях, таких как вода [10, 11], сжиженные инертные газы [12], так и сильновязких жидкостях, таких как масло [13], глицерин<sup>14</sup>. Разрядные промежутки могли иметь размеры от нескольких микронов [15, 16] или нескольких миллиметров [17] до метра [13].

В данной работе впервые изучались наносекундные электрические микроразряды в жидком пчелином меде. Пчелиный мед представляет собой сильновязкую жидкость желто-коричневого цвета. Физические свойства меда зависят от места его сбора и условий хранения. Согласно статьям [18–21] жидкий мед может иметь следующие физические свойства: влагосодержание – 20–25 %, pH – 3,1–4,5, электропроводность – 0,1–1,1 мС/см. Вязкость меда сильно зависит от температуры, она согласно статье [19] может принимать значение из диапазона 10–30 Па·с при комнатной температуре.

И самое главное: мед представляет собой сильно перенасыщенный раствор природных сахаров в воде. Жидкое состояние перенасыщенного раствора, как известно, неустойчиво. Малое физическое возмущение должно приводить к его кристаллизации. Целью данной работы является экспериментальная проверка предположения о том, что наносекундные электрические микроразряды в объеме жидкого меда могут являться такими возмущениями, вызывающими быструю кристаллизацию сахаров. Авторам неизвестны

другие работы, в которых исследовались бы электрические разряды в перенасыщенных растворах. Известна лишь статья [22], в которой изучалась кавитация в перенасыщенных водных растворах  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  и  $\text{KMnO}_4$  под действием наносекундного лазера. В этой работе наблюдалось образование зародышей кристаллов. Укажем, что лазерная кавитация жидкости и электрический пробой жидкости – процессы физические похожие [4]: в обоих случаях в жидкости возникает паровая газо-плазменная полость, которая затем схлопывается. Но поскольку электропроводность меда весьма мала по сравнению с электропроводностью перенасыщенных водных растворов солей, то выбор меда в нашей работе в качестве модельной жидкости для кристаллизации, в отличие от работы [22], оправдан тем, что осуществить электрический разряд в каком-либо проводящем водном растворе солей было бы затруднительно.

## Оборудование и материалы

Для экспериментов использовался натуральный пчелиный мед российской фирмы Medovaya Dolina LLC [23], находящийся в жидком состоянии. Время сбора – май 2014. Основные медоносы: ива (*Salix*), черноклен (*Acer tataricum*), мать-и-мачеха (*Tussilago*), одуванчик (*Taraxacum*), белая и желтая акация (*Acacia*), эспарцет (*Onobrychis*). Отметим, что при спокойном хранении (без возмущений) этот мед в течение 1 года оставался в жидком состоянии без заметного засахаривания.

Для эксперимента была изготовлена простая разрядная ячейка, подобная описанной в статьях [24–26]. Она изготавливалась следующим образом. Бралось стандартное предметное стекло для микроскопов, имеющее размеры  $1'' \times 3''$  и толщину 1 мм. Сначала к предметному стеклу с помощью двухсторонней липкой ленты приклеиваются два покровных стекла размерами  $0,94'' \times 0,94''$  и толщиной 0,15 мм. К ним, также с помощью двухсторонней липкой ленты, крепятся два электрода, которые с хорошей точностью можно предварительно вырезаны обычными бытовыми ножницами из алюминиевой фольги толщиной 10–15 мкм. Форма электродов – клин. Таким образом. Острия электродов отстоят от поверхности предметного стекла на толщину 0,15 мм.

После установки электродов в межэлектродный промежуток вносится капля меда диаметром 1–2 мм так, чтобы острия электродов находились внутри капли на глубину 0,15 мм. Схема разрядной ячейки показана на рис. 1.

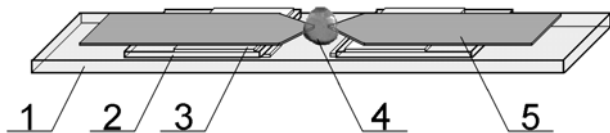


Рис. 1. Схема разрядной ячейки: 1 – предметное стекло; 2 – покровное стекло; 3 – двухсторонняя липкая лента; 4 – капля меда; 5 – фольговый электрод

Для детальной визуализации канала микроразрядов использовался оптический микроскоп Levenhuk D50L NG, оснащенный цифровой видеокамерой DEM200. Наибольшее увеличение оптической системы микроскопа составляет  $640\times$ , а с дополнительной линзой Барлоу –  $1280\times$ . Получаемые изображения имеют высокое разрешение ( $1600 \times 1200$  пикселей). Наблюдение за процессами внутри капли проводилось методом висячей капли [27]. Для этого приготовленная разрядная ячейка размещалась на предметном столике микроскопа так, чтобы капля была обращена книзу. Процесс кристаллизации записывался в режиме видео с частотой 7 кадров в секунду.

К электродам подключается генератор импульсного напряжения. В качестве генератора использовалась бытовая электрозажигалка Iskorka-6 трансформаторного типа, которая выдает последовательность наносекундных импульсов высокого напряжения. Импульсы следуют с частотой 20 Гц. При подключении к выходу генератора нагрузки в виде искрового промежутка, в цепи возникают импульсы тока разряда. Типичная осциллограмма импульса тока в цепи разряда на искровой промежуток показана на рис. 2.

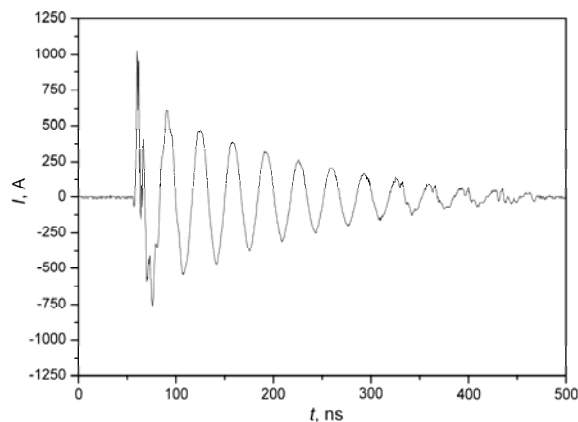


Рис. 2. Типичная осциллограмма импульса тока разряда

Из этой осциллограммы ясно, что в течение одного импульса полярность электродов и направление тока меняются с периодом примерно 40 нс – собственным периодом колебательного контура выходной цепи генератора с нагрузкой.

### Результаты экспериментов

Эксперименты проводились в воздухе атмосферного давления при температуре  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Было сделано несколько видеозаписей процесса взаимодействия электрических наносекундных микроразрядов с медом длительностью примерно 1 минута. На рис. 3 показаны некоторые кадры одной из видеозаписей, когда межэлектродный промежуток был  $\sim 180\text{ }\mu\text{m}$ .

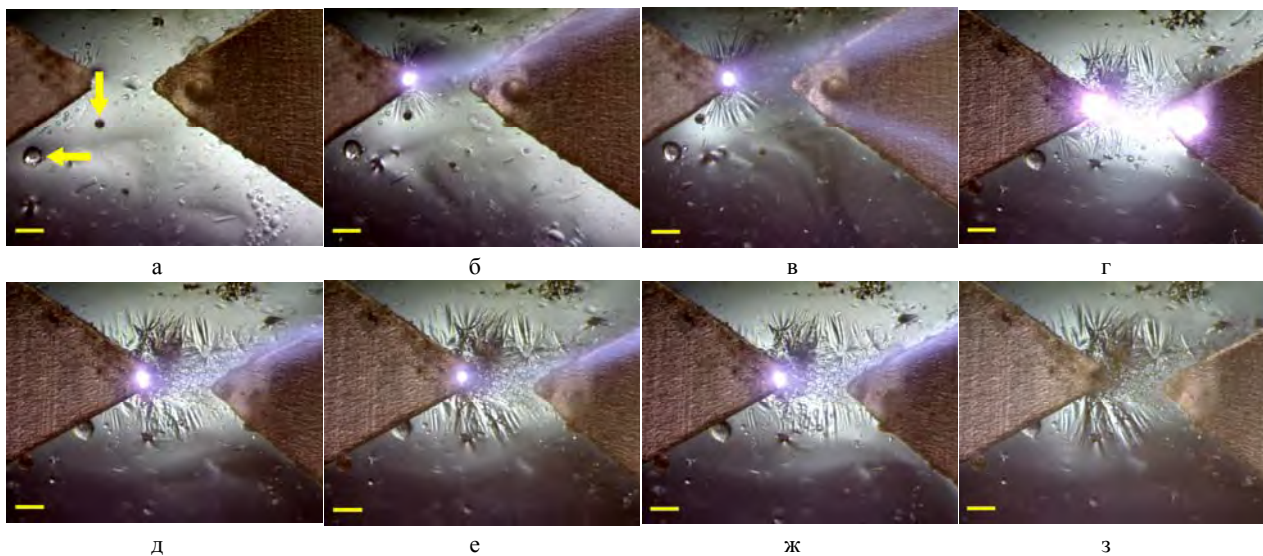


Рис. 3. Кадры видеосъемки процесса кристаллизации сахаров в меде, везде отрезок в левом нижнем углу –  $100\text{ }\mu\text{m}$ : а – 3,1 с, видно рождение кристаллических усиков у острия левого электрода, большой шарик слева – воздушный пузырек диаметром  $\sim 50\text{ }\mu\text{m}$  (горизонтальная стрелка), у левого электрода темный шарик диаметром  $\sim 50\text{ }\mu\text{m}$  – частица пыльцы растения-медоноса (вертикальная стрелка); б – 6,1 с, рост кристаллических усиков; в – 17,0 с, дальнейший рост кристаллических усиков; г – 32,5 с, замыкание межэлектродного промежутка кристаллическим каналом; д – 34,1 с, рост усиков на стенках кристаллического канала; е – 42,0 с, дальнейший рост усиков на стенках кристаллического канала; ж – 45,6 с, дальнейший рост усиков на стенках кристаллического канала; з – 50,2 с, конечное состояние кристаллического канала

Согласно им, динамика процесса взаимодействия такова.

Сначала, спустя после включения генератора со стороны одного из электродов (в нашем случае он слева) появляются усы кристаллов сахаров, растворенных в меде. Они растут и к моменту  $\sim 30$  с заполняют весь межэлектродный промежуток, формируя твердый канал. В дальнейшем длина усов растет, растет и толщина стенки канала.

Интересно проследить за движением воздушно-го пузырька и частицы пыльцы, случайно оказавшихся вблизи межэлектродного промежутка. Воздушный пузырек притягивается к одному из электродов и залипает на нем. Частица пыльцы прилипает к растущим усам кристаллов и движется вместе с фронтом роста кристаллов.

### Выводы

Таким образом, в данной работе впервые осуществлены электрические разряды в меде – в перенасыщенном растворе сахаров и показано, что периодическая последовательность наносекундных микрозарядов вызывает быструю кристаллизацию сахаров.

### Литература

1. Akiyama H. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2000, **7**, 646–653.
2. Sato M. *Plasma Sources Science and Technology*, 2008, **17**, 024021.
3. Bruggeman P. and Leys C. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, **42**, 053001.
4. Ushakov V. Y., Klimkin V. F., Korobeynikov S. M. *Impulse Breakdown of Liquids*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2007.
5. Yang Y., Cho Y. I., Fridman A. *Plasma Discharge in Liquid. Water Treatment and Applications*, CRC Press Taylor & Francis Group, New York, 2012.
6. Zhang J., Chen J., Li X. *Journal of Water Resource and Protection*, 2009, **2**, 99–109.
7. Gupta S. B., Bluhm H. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, **36**, 1621–1632.
8. Sugiarto T., Ito S., Ohshima T., Sato M., Skalny J. D. *Journal of Electrostatics*, 2003, **58**, 135–145.

9. Šunka P., Babický V., Člupek M., Beneš J., Poučková P. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, **32**, 1609–1613.

10. Šunka P. *Physics of Plasmas*, 2001, **8**, 2587–2594.

11. Hosseini S. H. R., Iwasaki S., Sakugawa T., Akiyama H., *Journal of the Korean Physical Society*, 2011, **59**, 3526–3530.

12. Jones H. M., Kunhardt E. E. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1995, **28**, 178–188.

13. Lesaint O., Massala G. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1998, **5**, 360–370.

14. Saksono N., Ariawan B., Bismo S. *International Journal of Technology*, 2012, **1**, 8–15.

15. Ihara T., Kiyon T., Katsuki S., Furusato T., Hara M., Akiyama H. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, **39**, 2650–2651.

16. Schoenbach K., Kolb J., Xiao S., Katsuki S., Minamitani Y., Joshi R. *Plasma Sources Science and Technology*, 2008, **17**, 024010.

17. Ito T., Terashima K. *Applied Physics Letters*, 2002, **80**, 2854–2856.

18. Szczęśna T., Rybak-Chmielewska H. *Journal of Apicultural Science*, 2004, **48**, 97–102.

19. Kayacier A., Karaman S., *Journal of Texture Studies*, 2008, **39**, 17–27.

20. Saxena S., Gautam S., Sharma A. *Food Chemistry*. 2010, **118**, 391–397.

21. A-Rahaman N. L., Chua L. S., Sarmidi M. R., Aziz R. *Agricultural Sciences*, 2014, **4**, 46–51.

22. Soare, R. Dijkink, M. R. Pascual, C. Sun, P. W. Cains, D. Lohse, A. I. Stankiewicz, and H. J. M. Kramer, *Crystal Growth and Design*, 2011, **11**, 2311–2316.

23. Medovaya Dolina LLC, <http://www.medovayadolina.com/>.

24. Dubinov E., Kozhayeva J. P. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, **42**, 2049–2053.

25. Shatalova V. V., Dubinov A. E. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, **42**, 2644–2645.

26. Kozhayeva J. P., Lyubimtseva V. A., Zuimatch E. A., Dubinov A. E. *Plasma Processes and Polymers*, 2015, **12**, 293–296.

27. Tsekova D. S. *Bulgarian Chemical Communications*, 2012, **44**, 267–271.