

УДК 532.54

Н.А. Колтовой

Центральная Поликлиника ОАО «РЖД», Россия,
107078, Москва, ул. Новая Басманная, д.5, E-mail: koltovoi@mail.ru

ИЗУЧЕНИЕ ПОТОКОВ В КАПЛЕ ВЫСЫХАЮЩЕЙ БИОЖИДКОСТИ

Изучаются потоки жидкости, возникающие в капле биожидкости, находящейся на подложке. Рассматриваются различные физические процессы, происходящие в испаряющейся капле. Актуальность задачи определяется различными приложениями:

- нанотехнологии - изготовление наноматериалов, образование структур и нанокластеров в растворах наночастиц, самосборка наночастиц;
- медицинская диагностика - изучения функциональных свойств биожидкостей, исследование процессов самоорганизации в капле биожидкости;
- разработка современных методов печати для струйных принтеров.

КАПЛЯ ЖИДКОСТИ, ИСПАРЕНИЕ, ТЕЧЕНИЯ, КОНВЕКЦИЯ, НАНОЧАСТИЦЫ, САМООРГАНИЗАЦИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы испарения в капле биожидкости изучаются при решении задач медицинской диагностики ([1], [2]). Процессы испарения чистой воды и растворов принципиально различаются. При испарении капли чистой воды сохраняется краевой угол, при этом площадь контакта с подложкой сокращается. При испарении растворов площадь контакта с подложкой не изменяется (явление пиннинга), а уменьшается краевой угол. В работе исследовалось испарение капли сыворотки крови. В отличие от воды, сыворотка крови представляет собой коллоидный раствор, в котором так же имеется большое количество высокомолекулярных веществ (белков). Вода составляет 90% сыворотки крови. Раскапывается 20 мкл сыворотки крови на поверхность предметного стекла. Диаметр капли на поверхности стекла составляет 7 мм. Высота капли – 0,5 мм. Высушивание производится при комнатной температуре.

ВЫЯВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

1) *Испарение.* Испарение воды осуществляется с поверхности капли. Однако, поверхность капли покрыта пленкой поверхностно-активных веществ, растворенных в сыворотке (липиды). Получается, что испарение осуществляется через пленку. В связи с этим скорость испарения воды будет существенно отличаться от скорости испарения с капли чистой воды.

2) *Перепад температур.* За счет испарения воды верхняя поверхность капли немного охлаждается, и со дна поднимаются вверх более теплые слои капли. Измерения с помощью пирометра показывают, что если температура подложки (стекла) составляет 28,1 градуса, то температура на поверхности капли составляет 24,8 градуса. При этом самая низкая температура на поверхности расположена в центре капли. Ближе к краю температура

повышается, и на краю совпадает с температурой подложки. Таким образом, перепад температур составляет 3,3 градуса при толщине капли 0,5 мм. Если с помощью тепловизора зарегистрировать распределение температур на поверхности капли, то картина будет соответствовать распределению восходящих и нисходящих потоков жидкости (ячеек Бенара) [3].

3) *Диффузия*. Перемешивание в капле осуществляется с помощью двух процессов – диффузия и конвекционное течение. Однако, процессы диффузии являются достаточно медленными по сравнению с процессами испарения. Поэтому в основном перераспределение жидкости осуществляется не за счет диффузии, а за счет конвекции.

4) *Трейсеры*. Потоки легко наблюдать, если в сыворотку крови добавить немного эритроцитов. Диаметр эритроцита – 8 мкм. Эритроциты выступают в роли трейсеров (трейсер – частица, по траектории движения которой судят о направлении потока жидкости). Траектория движения эритроцитов хорошо видна под микроскопом.

5) *Ячейки Бенара*. Первые 10 секунд после нанесения капли заметных изменений не происходит. Затем, в течение одной минуты процесс перемешивания самоорганизуется в структуру отдельных вихрей и получается структура из конвекционных ячеек – ячеек Бенара. Диаметр образовавшихся ячеек составляет один миллиметр. Чем больше площадь (объем) капли, тем больше ячеек образуется. Конвекционные ячейки имеют пространственный характер в форме призм, у периферии которых конвективные токи направлены вверх – активная струя, а в центре конвективные токи направлены вниз – реактивная струя. Бывает два типа ячеек Бенара. В ячейке I-типа в центре поток двигается наверх, а по краям поток двигается вниз. В ячейке G-типа потоки двигаются в обратном направлении, в центре поток двигается вниз, а по краям поток двигается вверх. В центральной части капли возникают автономные замкнутые конвекционные ячейки (от 2 до 4), в центре которых идут нисходящие потоки, а по краям – восходящие потоки. В краевой зоне капли расположено ориентировочно 15 открытых ячеек. В открытых ячейках край капля играет роль центра ячейки, и потоки на краю направлены сверху-вниз. В открытых ячейках идут потоки по поверхности капли от центра к краю, а по дну капли – от края к центру, рис.1.

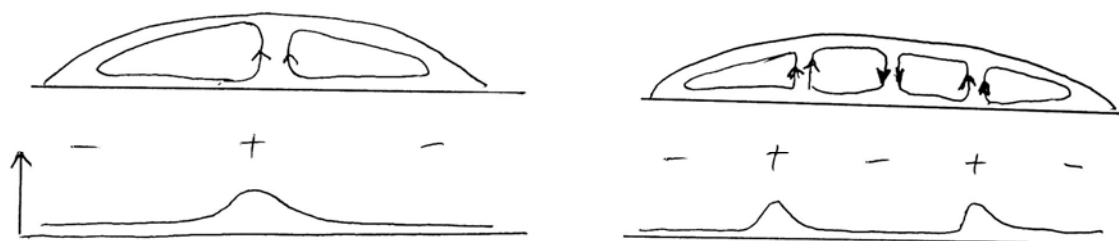


Рис. 1. Тороидальное и ячееистое течение

Так как структура сыворотки сильно неоднородна, то однородных ячеек не возникает. Возникают ячейки различной формы, определяемой локальными изменениями плотности сыворотки рис. 2. Для визуализации ячеек необходимо добавить больше эритроцитов. После застывания капли можно видеть застывшую картину ячеек. Дело в том, что эритроциты постепенно опускаются на дно капли. Течениями жидкости эритроциты перемещаются в те места, где находятся восходящие потоки. Одновременно они вымываются из тех мест, где находятся нисходящие потоки. Таким образом, картина сгущений эритроцитов на дне капли соответствует границам конвекционных потоков.

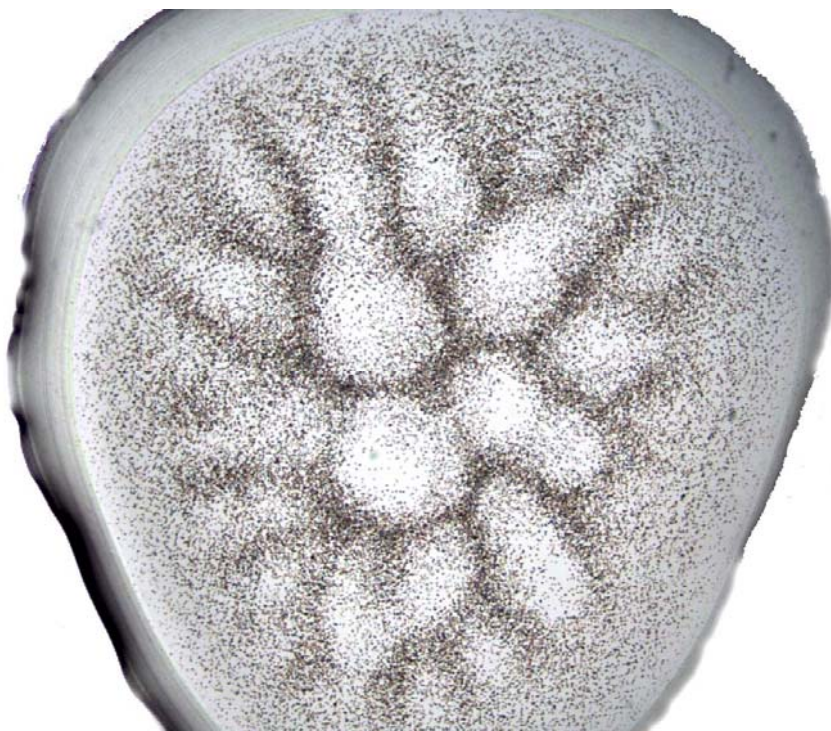


Рис. 2. Картина конвекционных ячеек в высыхающей капле. Диаметр капли – 7 мм

Необходимо отметить, что конвекционные ячейки локализованы в центральном слое капли. Нижний слой капли неподвижен, в нем находятся высокомолекулярные соединения, сцепленные с поверхностью предметного стекла. Верхний слой капли так же неподвижен. Он представляет из себя мономолекулярный слой поверхностно-активных веществ (липидов).

6) *Структура конвекционных потоков* в виде ячеек наблюдается в ограниченной области пространства трех параметров: вязкость жидкости, толщина слоя, перепад температур (в узком диапазоне значений толщины, вязкости, градиента температуры). В 1900 году в классической работе Бернара [4] описывается возникновение ячеек в тонком слое жидкого жира кашалота на подогреваемом снизу металлическом горизонтальном листе. В 1888 году James Thomson наблюдал конвекционные структуры в сосуде с мыльной водой. В работе [3] описываются конвекционные ячейки в воде.

По мере испарения воды увеличивается вязкость капли. При достижении вязкости некоторого критического значения (обычно через 5 минут после начала процесса испарения) движение в ячейках прекращается. Возникает одна конвекционная ячейка в виде тора, в которой восходящий поток расположен в центре, а нисходящие потоки расположены по краям капли. В верхней части капли течение направлено от центра капли к периферии, а в нижней части капли течение направлено от края к центру. По мере испарения воды вязкость капли возрастает, и скорость движения жидкости уменьшается. Ориентировочно через 20 минут движение жидкости прекращается.

7) *Профиль скоростей*. В левой части капли верхний приповерхностный слой движется влево, а нижний придонный слой движется вправо. Скорость движения жидкости составляет 0,01 мм/сек. Самый нижний слой, который контактирует с предметным стеклом, остается неподвижным, в этом слое находятся частицы, прилипшие к стеклу. Неподвижен так же и самый верхний слой – тонкая пленка, образованная поверхностно-активными веществами (липидами), рис.3.

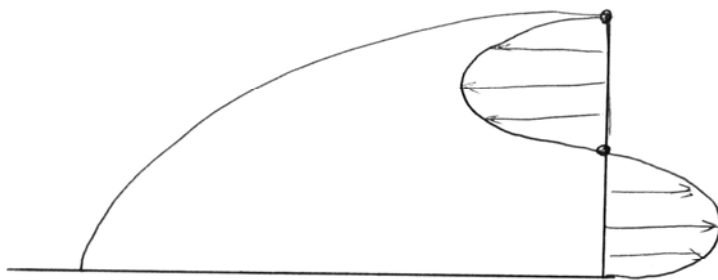


Рис. 3. Профиль скоростей течения в высыхающей капле

8) *Перевернутая капля*. Если каплю поместить на стекло, а затем стекло перевернуть, то капля окажется с нижней поверхности стекла. При наблюдении сверху в этом случае так же наблюдаются течения. Испарение воды осуществляется с нижней поверхности капли, значит нижняя поверхность капли холоднее, чем верхняя поверхность. Объяснить течения с помощью Рэлеевской модели конвекционной неустойчивости не получается. С помощью модели Марангони за счет поверхностного натяжения так же не получается, так как верхняя и нижняя поверхность капли неподвижна. Значит, существуют и другие причины для возникновения течений.

9) *Динамика процесса формирования течений* выглядит следующим образом:

- 1 – 0-10 секунд – нет видимых течений,
- 2 – 10-300 секунд – ячейки Бенара,
- 3 – 300-1200 секунд – тороидальное течение,
- 4 – 1200 секунд – прекращение течений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют:

- 1 – получить дополнительную информацию о свойствах биожидкости и понять некоторые причины процессов самоорганизации в высыхающей капле биожидкости,
- 2 – перейти от простого наблюдения течений к управлению течениями. Это позволит управлять формированием наноструктурных сборок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шабалин В.Н., Шатохина С.Н.** Морфология биологических жидкостей человека. М.: Хризостом, 2001. 304 с.
2. **Рапис Е.Г.** Белок и жизнь (самосборка и симметрия наноструктур белка). Иерусалим. М.: ЗЛ. Милта ПКПТИТ, 2002. 257 с.
3. **Иваницкий Г.Р., Деев А.А., Хижняк Е.П.** Биологическое значение тепловых узоров на поверхности воды. Сборник «Проблемы регуляции в биологических системах. Биофизические аспекты», М. РХД, 2007, с.292-328.
4. **Benard H.** Rev. generale sci. pures et appl. 11. 1261-1309. 1900.

N.A. Koltovoy

*Central clinic "RRW", Russia
107078, Moscow, yNew Basmmannaya str. 5, E-mail: koltovoi@mail.ru*

STUDY OF FLOWS IN A DROP ON THE SURFACE

The liquid flows arising in a drop of a bioliquid, located on the glass surface. The relevance of the task is determined by the different applications:

- nanotechnology-preparation of nanomaterials, education structures and nanoparticles in solutions of the nanoparticles, the self-assembly of nanoparticles;*
- medical diagnosis - study of the functional properties of biological liquids, study of the processes of self-organization in a drop of a bioliquid;*
- development of modern methods of printing for inkjet printers.*

**A DROP OF LIQUID, EVAPORATION, PRECIPITATION, CONVECTION,
NANOPARTICLES, SELF-ORGANIZATION.**