

03;12

Новая технология исследования многокомпонентных жидкостей с использованием кварцевого резонатора. Теоретическое обоснование и приложения

© Т.А. Яхно,¹ А.Г. Санин,¹ С.У. Vacca,² F. Falcione,² О.А. Санина,¹ В.В. Казаков,¹ В.Г. Яхно¹¹ Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия² Aria Analytics, Inc.,
44114 Cleveland, Ohio, USA
e-mail: tanya-yakhno@rambler.ru; cvacca@ariaanalytics.com

(Поступило в Редакцию 26 декабря 2008 г. В окончательной редакции 23 апреля 2009 г.)

Разработан новый способ анализа многокомпонентных жидкостей на основе сенсорного устройства, отличительной особенностью которого является получение „электронных подписей“ жидкостей, пригодных для их идентификации и паспортизации.

Информативную основу метода составляет динамика сложных процессов самоорганизации высыхающих капель, критичная к составу и структуре жидкости. Регистрация этой динамики в виде акустомеханического импеданса позволяет получить количественные различия между сравниваемыми жидкостями, что может использоваться для контроля их качества путем сравнения с эталоном.

PACS: 62., 64.60.A-, 64.75.Yz, 68.08.Bc, 68.08.De, 68.35.Rh, 83.85.Vb, 43.20.Ye, 43.58.Bh

Введение

В последние 20 лет бурное развитие получила микро-сенсорная диагностика многокомпонентных жидких сред, в том числе на основе кварцевых резонаторов. Чаще всего используются „кварцевые весы“, принцип работы которых основан на сдвиге резонансной частоты и изменении добротности резонатора при его нагружении объектом исследования. На этом принципе основаны методы определения вязкости [1], измерения массы осадка [2,3], кинетики агрегации компонентов [4], адгезионных свойств клеточных суспензий [5], вязко-эластических свойств полимерных пленок, образованных на поверхности сенсора при высыхании суспензий наночастиц [6] и т.д. Казалось бы, все технологические ресурсы сенсорных устройств на основе кварцевых резонаторов к настоящему времени уже известны и успешно используются.

В настоящей статье авторы анализируют и обобщают свой опыт получения информации о многокомпонентных жидкостях на основе регистрации динамических характеристик их высыхающих капель. Процесс самоорганизации высыхающих капель и техническая возможность регистрации динамики этого процесса, сведенные воедино, позволили создать технологию, открывающую новые перспективы для исследования жидких сред, а также для развития ряда практических приложений на ее основе.

Предыдущие выступления и публикации авторов показали, что многие коллеги, впервые знакомясь с данной технологией, как правило, нуждаются в дополнительных разъяснениях ее сути. В этой статье хотелось бы предельно подробно разобрать принципы, на которых основана технология, и продемонстрировать ее прак-

тические возможности, а также чтобы этот простой в использовании метод, основанный на сложных физико-химических процессах в высыхающих каплях, получил дальнейшее развитие и был полезен для решения ряда исследовательских и прикладных задач.

1. Методика

1.1. Описание устройства

Используемый нами резонатор выполнен в виде кварцевой пластины $\text{хус}/1^\circ 30'$ среза размером $48.0 \times 4.5 \times 1.2 \text{ mm}$. Устройство и мода колебаний резонатора представлены на рис. 1. Резонатор совершает колебания сжатия-расширения по длине, при этом его

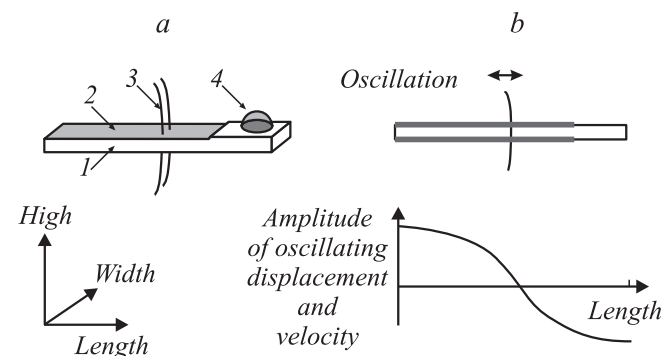


Рис. 1. Устройство и мода колебания кварцевого резонатора: *a* — резонатор с каплей исследуемой жидкости, *1* — кварцевая пластина, *2* — металлическое напыление, *3* — поддерживающие проводники, *4* — капля исследуемой жидкости. *b* — распределение амплитуды колебаний сжатия-растяжения резонатора вдоль длины пластины.

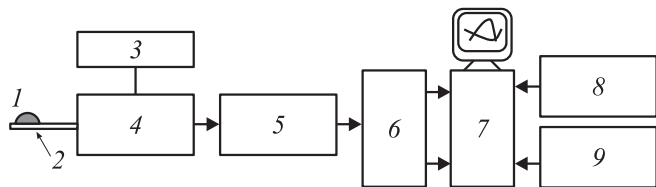


Рис. 2. Блок-схема устройства: 1 — капля жидкости, 2 — кварцевый резонатор, 3 — генератор, 4 — мостовая схема, 5 — амплитудный детектор, 6 — АЦП, 7 — ПК, 8 — программа отображения сигнала, 9 — программа обработки сигнала.

боковые поверхности совершают колебания сдвига. В процессе измерений рабочая частота колебаний кварцевой пластины принудительно поддерживается постоянной и равной резонансной частоте ненагруженного резонатора — 60 kHz. Амплитуда колебаний ненагруженного резонатора синусоидально распределена по длине пластины (рис. 1, b). Капля исследуемой жидкости помещается вблизи конца пластины (рис. 1, a). Оценки показали, что распределение амплитуды колебаний по длине пластины практически не изменяется при взаимодействии поверхности резонатора с объектом (каплей). Другими словами, сохнувшая капля не вносит искажений в распределение колебательной скорости по длине резонатора, показанное на рис. 1, b.

Измеряемой величиной является комплексная электрическая проводимость резонатора, нагруженного каплей, при этом собственная емкость резонатора и емкость соединительного кабеля вычитаются мостовой схемой устройства (рис. 2). Значения акустомеханического импеданса (АМИ) капли вычисляются из измеряемой величины электрической проводимости [7] и выводятся на экран в режиме реального времени (рис. 3). На

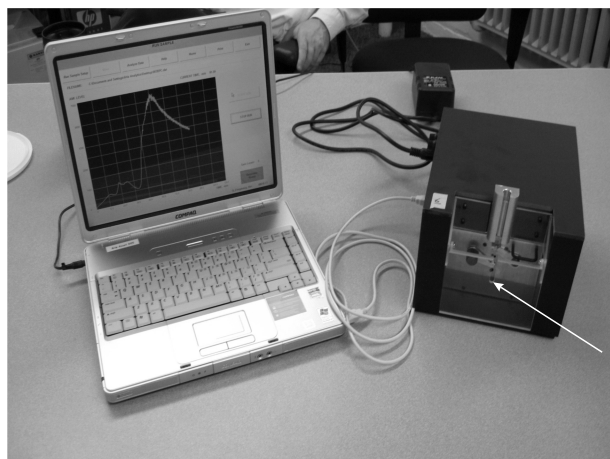


Рис. 3. Общий вид устройства. Стрелкой показано местоположение кварцевого резонатора с высыхающей на нем каплей исследуемой жидкости. Слева — программного обеспечения с отображением сигнала АМИ vs. Время.

настоящем этапе развития технологии измеряется, отображается и записывается величина модуля АМИ.

1.2. Что отражает АМИ?

АМИ является величиной акустического или механического импеданса объекта, нагружающего кварц в режиме сдвиговых колебаний. В данном случае исследуется такой специфический объект, как капля жидкости, высыхающая на поверхности кварца (подложке). Поэтому можно полагать, что АМИ интегрально включает в себя такие физические характеристики объекта, как вязкость, эластичность, трение и масса с разной степенью адгезии к подложке:

$$\begin{aligned} \text{АМИ} = & H_1(1 + j)S\sqrt{2\pi f\eta\rho} + H_2j \cdot 2\pi f m \\ & + H_3 \frac{k}{j \cdot 2\pi f} + H_4 k_{\text{fric}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где j — мнимая единица; S — площадь контакта капли с кварцем; f — частота колебаний кварца; η — начальная вязкость жидкости; ρ — начальная плотность жидкости; m — масса; k — эластичность; k_{fric} — коэффициент трения.

Первое слагаемое в (1) описывает величину акустического импеданса вязкой жидкости, соприкасающейся с подложкой на площади S , второе — значение механического импеданса массой m , колеблющейся вместе с подложкой, третье — величину акустического или механического импеданса нагрузки в виде упругого (эластичного) элемента, четвертое — значение акустического или механического импеданса диссипативных потерь (трения).

Каждое слагаемое имеет свой весовой коэффициент: H_1, H_2, H_3, H_4 . Эти коэффициенты исходно имеют различные значения у разных жидкостей и изменяются по-разному в процессе высыхания капли, в зависимости от свойств жидкости (состава, структуры). Это вносит индивидуальность в динамику АМИ, что отражается на форме кривой, выводимой на экран.

В начале процесса, пока капля жидкая, ее импеданс пропорционален характеристическому сопротивлению вязкой волны [8]:

$$\text{АМИ}_{\text{beg}} = H_1(1 + j)S\sqrt{2\pi f\eta\rho}, \quad (2)$$

где АМИ_{beg} — значение АМИ в начале процесса высыхания.

Обычно для исследуемых жидкостей $\eta \sim 10^{-2}$ Па и $\rho \sim 10^3$ kg/m³. При этих условиях высота капли не влияет на величину АМИ, поскольку при выбранной частоте глубина проникновения вязкой волны имеет порядок 10 μ [8]. Поэтому в начале процесса высыхания можно полагать, что в выражении (1) весовой коэффициент $H_1 = 1$, а остальные весовые коэффициенты равны нулю: $H_2 = H_3 = H_4 = 0$.

В конце процесса высыхания на поверхности резонатора обычно остается твердотельное отложение. Резонатор при этом нагружается импедансом соколеблющейся массы m_{end} остатка

$$\text{АМИ}_{\text{end}} = H_2 f \cdot 2\pi f m_{\text{end}}, \quad (3)$$

где АМИ_{end} — значение АМИ в конце процесса высыхания; m_{end} — масса сухого остатка. Поэтому в конце процесса высыхания можно полагать, что весовой коэффициент $H_2 = 1$, а остальные весовые коэффициенты равны нулю: $H_1 = H_3 = H_4 = 0$.

Соответствие АМИ выражениям (2) и (3) в начале и конце процесса высыхания было экспериментально проведено по измерениям действительной и мнимой частей электрической проводимости резонатора (или по измерениям действительной и мнимой частей АМИ). Проверка показала, что начальное и конечное значения АМИ, как правило, можно описывать выражениями (2) и (3). Однако столь простые ситуации, как „жидкая капля в начале“ и „твердый остаток в конце“, имеют место не всегда. Например, в начале высыхания некоторые жидкости имеют АМИ с неравными действительной и мнимой частями (в отличие от (2)). Или в конце высыхания жидкости имеют АМИ с ненулевой действительной частью (в отличие от (3)).

Решающим фактором при использовании измерения АМИ в режиме сдвиговых колебаний является чрезвычайная чувствительность его величины к возникновению и росту новой фазы на границе жидкость–кварц, а также к акустическим и механическим свойствам (например, эластичности) образующихся структур (отложений).

1.3. Преимущества анализа жидкости в виде капли, высыхающей на сенсоре

Капля жидкости, высыхающая на твердой смачиваемой подложке, представляет собой естественную модель самоорганизующейся системы с бесконечно большим разнообразием вариантов течения процессов, в зависимости от состава и структуры жидкости.¹ Процесс высыхания капли определяется исходными параметрами раствора: поверхностным натяжением, смачиванием, вязкостью, внутренней структурой, дисперсностью, теплопроводностью, ионной силой, рН. Эти факторы влияют на такие чувствительные процессы, как агрегация, преципитация, седиментация, гелеобразование и кристаллизация, сопровождающие процесс высыхания многокомпонентной жидкости [9]. В результате изменяются физические свойства капли, динамика которых получает отображение в виде кривой в координатах АМИ–время. Наши исследования показали, что форма кривой АМИ является паспортной характеристикой жидкости.

Единственным строго контролируемым параметром капли в нашей технологии является ее объем. Обычно

¹ Здесь и далее имеются в виду одинаковые условия внешней среды, включая подложку.

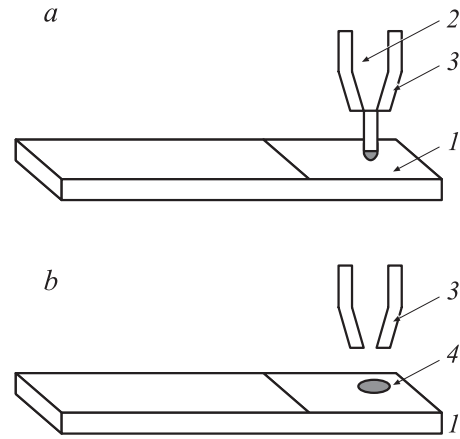


Рис. 4. Схема размещения капли исследуемой жидкости на поверхности кварца. *a* — начало выхода капли из микродозатора, *b* — расположение капли на поверхности кварцевой пластины. 1 — кварцевый резонатор, 2 — микродозатор со стеклянным наконечником, содержащим исследуемую жидкость, 3 — кронштейны, направляющие и поддерживающие микродозатор, 4 — капля жидкости на поверхности кварца.

используется объем 3 или $5 \mu\text{l}$. Естественно, объем капель сравниваемых между собой жидкостей должен быть одинаковым. Капля размещается с помощью микродозатора² и направляющих его кронштейнов в строго определенное место кварцевой пластины, с небольшой высоты, исключающей разбрызгивание (рис. 4). Площадь растекания капли нами не лимитируется, поскольку она отражает степень смачивания подложки и является одной из важных характеристик жидкости [9]. Поэтому одинаковое качество поверхности сенсора является критичным для данной технологии. Перед началом и после окончания измерения поверхность сенсора последовательно обрабатывается водой и изопропиловым спиртом, после чего тщательно просушивается. Такая процедура обработки поверхности кварца позволяет получать хорошо воспроизводимые результаты при повторных промерах капель одной и той же жидкости.

Итак, первый параметр, обеспечивающий информативность „капельной“ технологии — это смачивание поверхности сенсора. При одинаковом объеме капель сравниваемых жидкостей и разной степени смачивания капли этих жидкостей будут иметь различную форму: одна — более плоскую, с большей площадью основания, другая — более округлую, с меньшей площадью основания. Это непременно обеспечит различие как в исходной величине сигнала (2), так и в динамике структуризации этих капель [10].

Другим важным параметром, влияющим на динамику АМИ, являются физические свойства формирующихся верхнего и нижнего адсорбционных слоев. Экспериментально доказано [11–13], что в капле многокомпонентной жидкости происходит перераспределение ком-

² Ошибка дозирования составляет $\pm 1\%$ от отмеряемого объема жидкости.

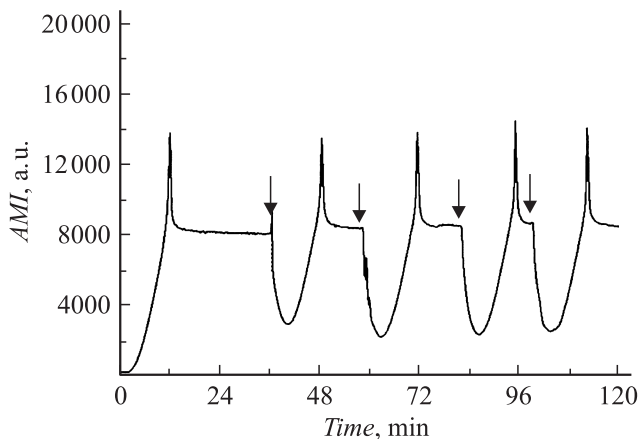


Рис. 5. Кривые АМИ высыхающих капель 7% раствора БСА в 0.9% растворе NaCl до и после повторного добавления дистиллированной воды к остаткам высохшей на сенсоре капли. Исходный объем капли раствора БСА — $3 \mu\text{l}$. Объем добавляемой воды к остаткам высохшей капли — $3 \mu\text{l}$. Момент добавления воды показан стрелками.

понентов жидкой фазы в соответствии с их поверхностной активностью. Концентрация и качественный состав поверхностно-активных веществ (ПАВ), формирующих адсорбционный слой на границе с воздухом, определяют его механические свойства — эластичность и плотность, в разной степени лимитирующие испарения воды, а следовательно, по-разному влияющие на динамику процессов структуризации. Различные варианты их рассмотрены в математической модели [14]. Присутствие ПАВ снижает также поверхностное натяжение на границе жидкость—подложка и угнетает гелеобразование в коллоидной фазе [15] вследствие образования структурно-механического барьера [16], обеспечивающего расклинивающее давление при образовании кластеров. Эти процессы также вносят свой вклад в динамику сигнала АМИ, поскольку размер кластеров существенно влияет на эволюцию структурообразования в высыхающих каплях [17]. Процессы самоорганизации в высыхающих каплях многокомпонентных жидкостей, отображаемые сигналом АМИ, полностью обратимы и хорошо воспроизводимы (рис. 5). Следует отметить, что модельное описание процессов, происходящих в капле при высыхании, является весьма непростой задачей. Даже для простых жидкостей с малым числом компонентов такое описание еще ждет своего воплощения.

2. Результаты и их обсуждение

На рис. 6 представлены этапы высыхания сыворотки крови практически здорового донора и соответствующие им участки кривой АМИ. Финальный участок кривой (справа) выходит на постоянный уровень и сохраняет его благодаря постоянной массе и достаточной эла-

стичности сформированного геля с рыхлосвязанной водой [17].

На рис. 7 показаны типичные кривые АМИ сыворотки крови лиц, погибших от передозировки наркотиков и алкоголя в сравнении с сывороткой здорового донора. Высокое содержание в крови метаболитов наркотических веществ угнетает гелеобразование в высыхающих каплях сыворотки, что делает их чрезвычайно хрупкими [18]. Даже небольшие колебания сжатия—растяжения

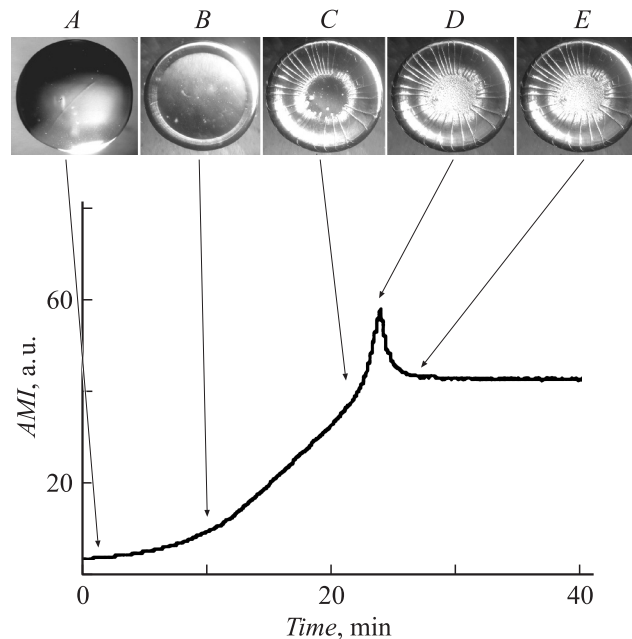


Рис. 6. А–Е — этапы высыхания капли сыворотки крови донора ($5 \mu\text{l}$) и соответствующие им участки кривой АМИ (снизу): А–В — формирование белкового валика по периферии и уплощение купола капли; В–С — гелеобразование; С–D — процесс кристаллизации соли в гелевой матрице; D–Е — испарение остатков свободной воды и достижение постоянного уровня сигнала. Этот уровень отражает массу капли с рыхло связанной водой и силу адгезии осадка к поверхности кварца.

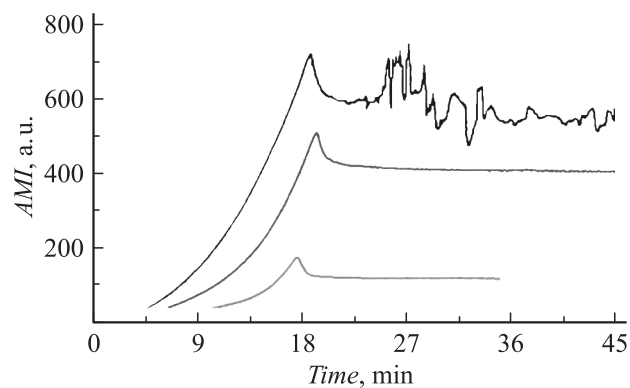


Рис. 7. Динамика АМИ высыхающих капель сыворотки крови (сверху вниз): лица, погибшего от передозировки наркотиков; практически здорового донора; лица, погибшего от алкогольной интоксикации. Объем капель — $5 \mu\text{l}$.

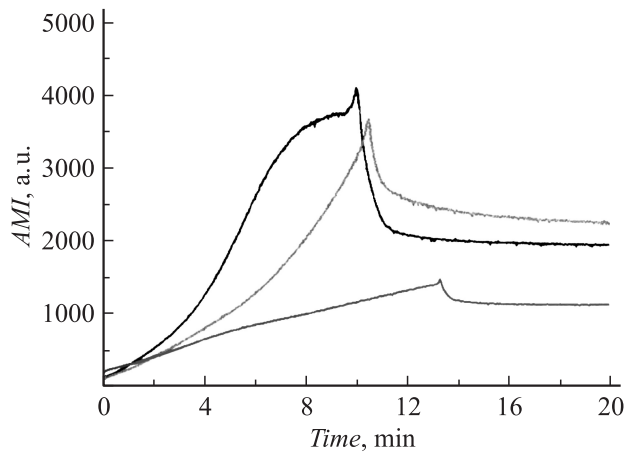


Рис. 8. Образцы чернил для принтера разных производителей. Объем капель — $5 \mu\text{l}$.

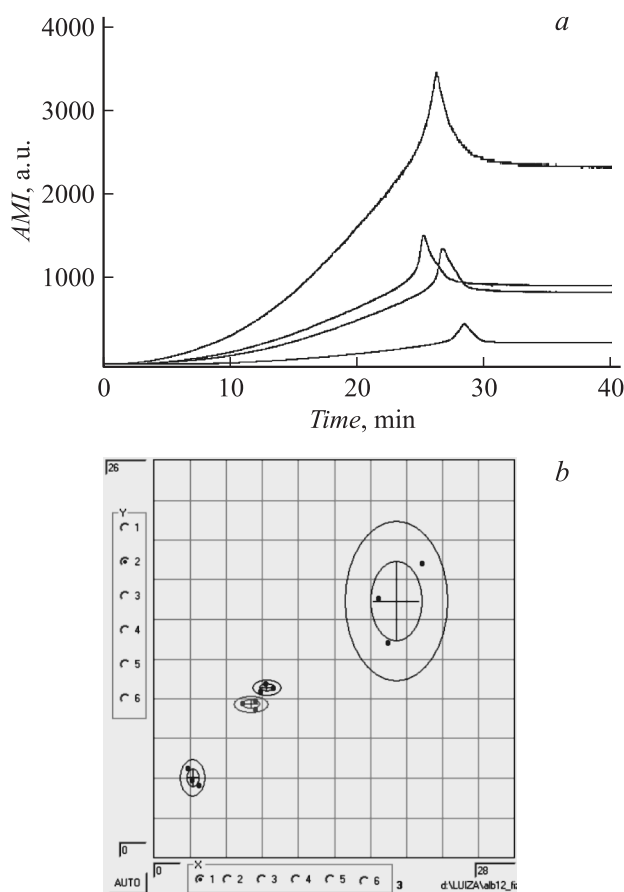


Рис. 9. Результаты исследования высыхающих капель объемом $5 \mu\text{l}$ растворов БСА разной концентрации в 0.9% растворе NaCl, *a* — не обработанные экспериментальные кривые, снизу вверх, % БСА: 3, 6, 7 и 12. *b* — распределение результатов повторных промеров на плоскости в координатах разных индексов формы ($M \pm 2\sigma$), снизу вверх, % БСА: 3, 6, 7 и 12.

кварца приводят к интенсивному растрескиванию остатков капель и откреплению их фрагментов от поверхности сенсора. Эта хаотически меняющаяся механиче-

ская нагрузка на кварц отражается на дисплее в виде неупорядоченных зигзагообразных линий. Кривые АМИ у лиц, погибших от алкогольной интоксикации, явно отличаются от кривых, описанных выше.

Формы кривых АМИ даже у жидкостей одного назначения могут существенно различаться между собой (рис. 8). Параметризация формы кривых по тем или иным алгоритмам — „Индексам формы“ [10,12,13] — позволяет представлять статистические различия между разными жидкостями на плоскости параметров.

Рассмотрим некоторые результаты экспериментов с модельными белково-солевыми растворами. На рис. 9 представлены результаты исследования высыхающих капель объемом $5 \mu\text{l}$ растворов БСА разной концентрации в физиологическом растворе NaCl. Главная причина различий в данном случае заключается в исходно разной массе капель.

Если взять водные белково-солевые растворы с одной и той же концентрацией БСА, но разной концентрацией соли (рис. 10), то кривые АМИ также будут иметь четкие различия. Здесь ведущим параметром различия

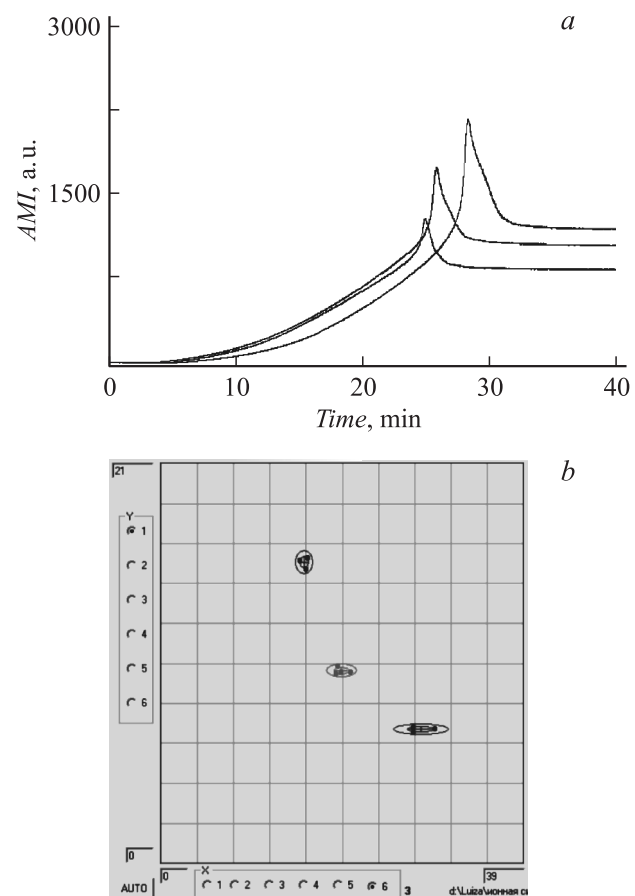


Рис. 10. Результаты исследования высыхающих капель объемом $5 \mu\text{l}$ 7% растворов БСА в растворах NaCl разной концентрации: *a* — не обработанные экспериментальные кривые, снизу вверх, % NaCl: 0.5, 1, 1.5; *b* — распределение результатов повторных промеров на плоскости в координатах разных индексов формы ($M \pm 2\sigma$), снизу вверх, % NaCl: 0.5, 1, 1.5.

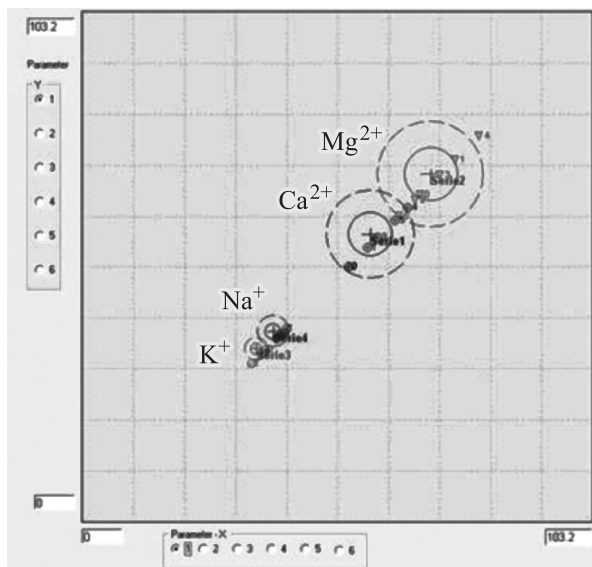


Рис. 11. Расположение на плоскости признаков в координатах одного из индексов формы ($M \pm 2\sigma$) результатов расчета динамики АМИ высыхающих капель растворов 7% БСА в 0.9% водных растворах разных солей: KCl, NaCl, $\text{CaCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ и $\text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$.

в динамике АМИ является свойство соли в зависимости от дозы повышать поверхностное натяжение на границах раздела фаз. Поэтому исходная форма капель этих растворов с ростом концентрации соли занимает меньшую площадь на кварце при более высоком куполе. Высохшие на кварце остатки капли также оказывают на него разное механическое воздействие, пропорционально концентрации соли.

В следующей серии экспериментов были приготовлены растворы 7% БСА в 0.9% водных растворах разных солей³: KCl, NaCl, $\text{CaCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ и $\text{MgCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$. Расчет концентраций производился с учетом гидратной воды. Результаты исследований представлены на рис. 11: один из индексов формы АМИ „выстроил“ данные в соответствии с рядом Гофмейстера [19]. Принимая во внимание эмпирическое уравнение (5) [20], можно с достаточной уверенностью утверждать, что такая последовательность расположения данных связана с особенностью взаимодействия каждого катиона с водой. Это взаимодействие проявляется в изменении вязкости раствора, которое регистрирует наш прибор (данное утверждение применимо и для разных концентраций одного и того же катиона). Как видно из таблицы порядок расположения данных на плоскости признаков (рис. 11) хорошо коррелирует с плотностью поверхностных зарядов катионов, приведенных в работе [20],

$$\eta/\eta_0 = 1 + AC1/2 + BC, \quad (5)$$

где η — вязкость водного раствора соли; η_0 — вязкость воды при той же температуре; C — концентрация; A —

³ Все концентрации были рассчитаны по весу.

электростатический коэффициент; B — мера взаимодействия катиона с водой (Jones-Dole viscosity B coefficient).

Таким образом, использование исследуемой жидкости в виде капли, высыхающей на поверхности колеблющегося кварцевого резонатора, благодаря множеству физико-химических параметров, интегрально влияющих на форму кривой АМИ, дает информацию о жидкости, достаточную для ее идентификации.

Примеры использования технологии в медицинской диагностике приведены нами в отдельных работах [13,21,22]. Возможность регистрации воздействия

Параметры катионов солей, использованных в эксперименте

Катион	Радиус иона, pm	Поверхность иона, pm ²	Плотность поверхностных зарядов, а.у.	B
K ⁺	138	239.3	0.59	-0.007
Na ⁺	102	130.7	1.06	0.086
Ca ²⁺	100	125.7	2.24	0.285
Mg ²⁺	72	65.1	4.3	0.385

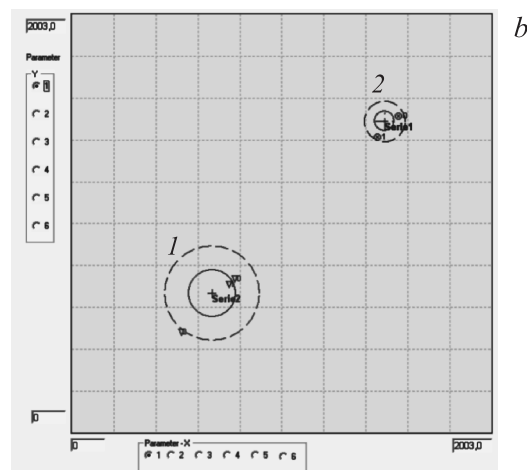
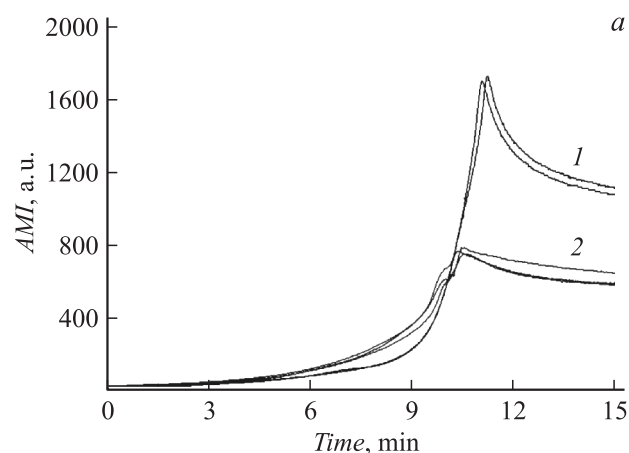


Рис. 12. Сравнение ликвидного (1) и фальшивого (2) серебризины, a — не обработанные экспериментальные кривые; b — расположение данных на плоскости признаков в координатах одного из индексов формы ($M \pm 2\sigma$).

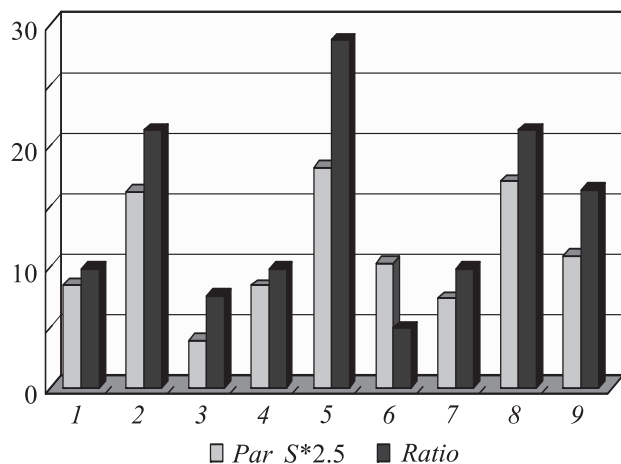


Рис. 13. Результат сравнения величины Ratio (отношения концентрации растворимых сухих веществ, %, к титруемой кислотности, g/l), рассчитанной традиционным способом для 9 соков различных производителей, и величины одного из индексов формы кривых АМИ их высыхающих капель ($Par_S*2.5$): 1 — апельсиновый № 1; 2 — яблочный № 1; 3 — клюквенный № 1; 4 — апельсиновый № 2; 5 — яблочный № 2 (восстановленный); 6 — клюквенный № 2 (восстановленный); 7 — апельсиновый № 3; 8 — яблочный № 3; 9 — апельсиновый № 4.

на жидкости ряда физических факторов (магнитного поля УФ-излучения, запахов, рентгеновского излучения) описаны в работах [9,23,24]. Возможность контроля качества вин, соков и напитков приведены в работах [25,26]. Технология может стать удобным инструментом для выявления фальсифицированных лекарственных средств экспресс-методом (рис. 12) [27], а также для одномоментного определения Ratio — отношения концентрации растворимых сухих веществ к титруемой кислотности — основного показателя качества соков, используемого в экспертных лабораториях (рис. 13) [28]. Коэффициент корреляции величин Ratio, полученных традиционным и нашим способом, составил 0.9, а время анализа и трудовые затраты сократились при этом в несколько десятков раз.

Заключение

Разработан новый способ анализа многокомпонентных жидкостей на основе сенсорного устройства, отличительной особенностью которого является получение „электронных подписей“ жидкостей, пригодных для их идентификации и паспортизации.

Информативную основу метода составляет динамика сложных процессов самоорганизации высыхающих капель, критичная к составу и структуре жидкости. Регистрация этой динамики и выражение ее в виде кривых АМИ позволяет получать количественные различия между сравниваемыми жидкостями, что может быть использовано для контроля их качества путем сравнения

с эталоном. Авторы надеются, что данный способ найдет применение в разных сферах человеческой деятельности.

Авторы глубоко признательны д.т.н. А.Ю. Колеснову (Московский государственный университет пищевых производств) за сотрудничество в области оценки качества соков; И.В. Спицкой, А.Б. Буровкину и В.М. Пожидаеву (Нижегородский областной центр по контролю качества и сертификации лекарственных средств) за консультативную помощь и предоставление лекарств для исследований, а также к.б.н. Л.М. Обуховой (Нижегородское бюро судебно-медицинской экспертизы) за предоставление материала и дискуссию.

Работа выполнена при частичной поддержке грантов по программе ОФН РАН „Фундаментальные проблемы нелинейной динамики“ и АФГИР RMA 10214-BNL-36943.

Список литературы

- [1] Martin S.J., Ricco A.J. // Appl. Phys. Lett. 1987. Vol. 50. P. 1474-1476.
- [2] Gomes M.T.S.R. // Curr. Topics Anal. Chem. 2001. Vol. 2. P. 187-193.
- [3] Yamasaki A., Cunha M.A.S.D.A., Oliveira J.A.B.P., Duarte A.C., Gomes M.T.S.R. // Biosensors and Bioelectronics. 2004. Vol. 19. P. 1203-1208.
- [4] Méndez-Vilas A., Kódar-Reyes A.B., Diaz J., González-Martín M.L. // Current Appl. Phys. 2009. Vol. 9. N 1. P. 48-58.
- [5] Li F., Wang J.H.-C., Wang O.M. // Biosensors and Bioelectronics. 2007. Vol. 23. N 1. P. 42-50.
- [6] Qin L., Chen H., Li J.M., Wang Q.-M. // Sensor and Actuators. A: Physical. 2007. Vol. 136. N 1. P. 111-117.
- [7] Yakhno T.A., Yakhno V.G., Sanin A.G., Sanina O.A., Pelyushenko A.S. // Proc. SPIE. Bioengineering and Bioinspired Systems. Maspolamas, Gran Canaria, Spain. 2003. Vol. 5119. P. 87-99.
- [8] Физическая акустика. Т. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований / Под ред. У. Мэзон. М.: Мир, 1960.
- [9] Яхно Т.А., Яхно В.Г. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 8. С. 133-141.
- [10] Yakhno T., Sanin A., Pelyushenko A., Kazakov V., Spasoshnikova O., Chernov A., Yakhno V., Vacca C., Dowell M., Falcone F., Johnson B. // Biosensors and Bioelectronics. 2007. Vol. 22. N 9-10. P. 2127-2131.
- [11] Яхно Т.А., Казаков В.В., Санин А.Г., Шапошникова О.Б., Чернов А.С. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 4. С. 119-122.
- [12] Яхно Т.А., Казаков В.В., Санин А.Г., Шапошникова О.Б., Чернов А.С. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 4. С. 123-127.
- [13] Яхно Т.А., Санин А.Г., Яхно В.Г. // Медицина в зеркале информатики. М.: Наука, 2008. С. 63-78.
- [14] Яхно Т.А., Яхно В.Г., Соколов А.В. // Биофизика. 2005. Т. 50. № 4. С. 726-734.
- [15] Яхно Т.А., Яхно В.Г., Санин А.Г., Пелюшенко А.С., Шапошникова О.Б., Чернов А.С. // Нелинейный мир. 2007. № 1-2. С. 47-54.
- [16] Ребиндер П.А. // Поверхностные явления в дисперсных системах. Коллоидная химия. М., 1978.
- [17] Yakhno T. // J. of Colloid and Interface Science. 2008. Vol. 318. N 2. P. 225-230.

- [18] Обухова Л.М., Эдалев Н.С., Конов А.С., Яхно Т.А., Шапошникова О.Б. // Тез. докл. V Междунар. научн. конф. „Кристаллизация для нанотехнологий, техники и медицины“. Иваново, 2008. С. 230.
- [19] Bostrom M., Williams D.R.M., Ninham B.W. // Current Opinion in Colloid and Interface Science. 2004. Vol. 9. P. 48–52.
- [20] Collins K. // Biophysical J. 1997. Vol. 72. P. 65–76.
- [21] Yakhno T., Sanin A., Yakhno V., Pelyushenko A., Dowell M., Vacca C., Goutorova V. // Proc. of SPIE. BIOS-2005, Advances Biomedical and Clinical Diagnostic Systems III. San Jose. California. USA, 2005. Vol. 5692. P. 188–198.
- [22] Yakhno T., Sanin A., Yakhno V., Pelyushenko A., Egorova N.A., Terentiev I.G., Smetanina S.V., Korochkina O.A., Yashukova E.V. // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. 2005. Vol. 24. N 2. P. 96–104.
- [23] Yakhno T.A., Yakhno V.G., Sanin A.G., Sanina O.A., Pelyushenko A.S. // Nonlinear Dynamics. 2005. Vol. 39. P. 369–374.
- [24] Яхно Т.А., Яхно В.Г., Санин А.Г., Санина О.А., Пелюшенко А.С. // ЖТФ. 2004. Т. 49. Вып. 8. С. 1055–1063.
- [25] Яхно Т.А., Яхно В.Г., Санин А.Г., Санина О.А., Кутяйкин В.Г., Усватов В.А. // Партнеры и конкуренты. РИА „Стандарты и качество“. 2003. Вып. 4. С. 29–33.
- [26] Yakhno T., Yakhno V., Sanin A. et al. // Proc. Euro Food Chem. XII. Strategies for safe food. Brugge. Belgium, 2003. Vol. 1. P. 342–345.
- [27] Санина О.А., Шапошникова О.Б., Санин А.Г., Яхно Т.А., Яхно В.Г. // Тез. докл. V Междунар. научн. конф. „Кристаллизация для нанотехнологий, техники и медицины“. Иваново, 2008. С. 236.
- [28] Яхно Т.А., Санин А.Г., Пелюшенко А.С., Тихомиров Д.А., Яхно В.Г. // Сб. мат. VI Межд. конф. „Вода, напитки и соки“. М., 2005. С. 66.