

В. В. Ковальчук, доктор фізико-математичних наук,
професор, директор
Одеського фахового коледжу комп'ютерних технологій
Одеського державного екологічного університету

Г. Ф. Кривда, доктор медичних наук, професор,
завідувач кафедри судової медицини
Одеського національного медичного університету

В. Є. Загородній, кандидат юридичних наук, доцент,
професор кафедри криміналістики
Національного університету «Одеська юридична академія»

І. В. Загородній, кандидат юридичних наук,
доцент кафедри криміналістики
Національного університету «Одеська юридична академія»

НЕРУЙНІВНИЙ МЕТОД АНАЛІЗУ СКЛАДУ СИРОВАТКИ КРОВІ У КРИМІНАЛІСТИЦІ

Статтю присвячено розгляду неруйнівних методів аналізу складу сироватки крові у криміналістиці, вирішення проблем та їх вдосконалення.

На сучасному етапі створення матеріалів і приладів нового покоління постає задача не лише управління їх властивостями, але й ефективного використання у різних галузях, зокрема, у криміналістиці.

Аналіз структурної еволюції гетеро атомної рідини (зокрема, крові) з позицій теоретичного та експериментального підходів дозволяє розкрити нові горизонти у практичній площині, визначити феноменологію процесу на основі сучасних методів дослідження.

Автори цієї роботи провели якісний та кількісний аналіз експериментальних даних, що стосуються кінетики та механізмів структуроутворення багатокомпонентної речовини у рідкому стані. Слід підкреслити, що структурна кінетика рідини, такої, як сироватка крові, або, власне кров, є складним багатостадійним процесом.

Процес самоорганізації рідини, що висихає, дозволяє здійснити технічну можливість реєстрації динаміки цього процесу. Ці процеси можуть бути з'єднані. Виходячи з цього нами запропоновано технологію, що відкриває нові перспективи для дослідження рідких середовищ, зокрема сироватки крові, а також для розвитку ряду практичних застосувань на її основі у криміналістиці.

Також слід зауважити, що структурна еволюція крапель, що висихають, біологічних рідин є складним багатостадійним процесом, в якому умовно можна виділити дві стадії: події, що відбуваються під час випарювання вільної води, і структуроутворення, що пов'язане з випаром води. Етапами структурного утворення першої стадії є: взаємодія рідини з підкладкою – за умови змочування, утворення лінії прикріплення до субстрату і розвиток відцентрової течії капілярної природи; утворення склоподібного шару на периферії краплі; розподіл розчинених компонентів у відповідності з їх поверхневими властивостями і утворення адсорбційних шарів по межах розділу фаз; каскад фазових переходів; кристалізація солі в матриці гелю.

Ключові слова: мікроскопічні дослідження, кінетика, сироватка крові, фізика, хімія, властивості.

V. V. Kovalchuk, H. F. Kryvda, V. Ye. Zahorodnii, I. V. Zahorodnii. Non-destructive method of analysis of blood serum composition in criminology

The article is devoted to consideration of non-destructive methods of blood serum composition analysis in forensics, problem solving and their improvement.

At the current stage of creating materials and devices of a new generation, the task is not only to manage their properties, but also to effectively use them in various fields, in particular, in forensics.

Analysis of the structural evolution of a heteroatomic liquid (in particular, blood) from the standpoint of theoretical and experimental approaches allows us to open new horizons in the practical plane, to determine the phenomenology of the process based on modern research methods.

The authors of this work conducted a qualitative and quantitative analysis of experimental data related to the kinetics and mechanisms of structure formation of a multicomponent substance in the liquid state. It should be emphasized that the structural kinetics of a liquid such as blood serum, or blood itself, is a complex multistage process.

The process of self-organization of the drying liquid makes it technically possible to record the dynamics of this process. These processes can be combined. Based on this, we proposed a technology that opens up new perspectives for the study of liquid environments, in particular blood serum, as well as for the development of a number of practical applications based on it in forensics.

It should also be noted that the structural evolution of drying droplets of biological fluids is a complex multistage process in which two stages can be conditionally distinguished: events occurring during the evaporation of free water and structure formation associated with water evaporation. The stages of the structural formation of the first stage are: the interaction of the liquid with the substrate – under the condition of wetting, the formation of a line of attachment to the substrate and the development of a centrifugal flow of a capillary nature; the formation of a vitreous layer on the periphery of the drop; the distribution of dissolved components in accordance with their surface properties and the formation of adsorption layers along the boundaries of the phase interface; cascade of phase transitions; salt crystallization in the gel matrix.

Key words: microscopic studies, kinetics, blood serum, physics, chemistry, properties.

Постановка проблеми. На сучасному етапі створення матеріалів і приладів нового покоління постає задача не лише управління їх властивостями, але й ефективного використання у різних галузях, зокрема, у криміналістиці.

Мета статті – полягає у розробці і використанні у практиці криміналістичного аналізу ефективної неруйнівної методики, що дозволяє провести аналіз структури рідини, зокрема, сироватки крові.

Мета реалізувалася шляхом розв'язуванню взаємопов'язаних задач, а саме: вдосконалити експериментальну методику на основі методу кварцового зважування, що описана у роботах [1-3]; провести ідентифікацію структури краплі крові, з'ясувати її топологію; проаналізувати фізико-хімічні властивості та морфологію речовини.

Виходячи з цього нами були визначені предмет та об'єкт дослідження.

Об'єкт дослідження склав процес вивчення властивостей рідини (крові) шляхом кварцового зважування.

Предмет дослідження – багатокомпонентна рідина (сироватка крові, кров пацієнта).

Структурна еволюція багатокомпонентної рідини. Аналіз структурної еволюції гетеро атомної рідини (зокрема, крові) з позицій теоретичного та експериментального підходів дозволяє розкрити нові горизонти у практичній площині, визначити феноменологію процесу на основі сучасних методів дослідження [3].

Автори цієї роботи провели якісний та кількісний аналіз експериментальних даних, що стосуються кінетики та механізмів структуроутворення багатокомпонентної речовини у рідкому стані. Слід підкреслити, що структурна кінетика рідини, такої, як сироватка крові, або, власне кров, є складним багатоетапним процесом. Останній можна поділити на дві стадії: події, що відбуваються під час випаровування вільної води, і, власне, структуроутворення. Останній етап – етап структуроутворення, пов'язаний з випарюванням води. Як доводять наші експерименти (2004-2005 рр.), рідина, що висихає на твердій змочуваній підкладці (за кімнатних зовнішніх умов), набуває специфічного зовнішнього вигляду (рис.1). Аналогічні результати були отримані в інших лабораторіях [4], один з яких продемонстрований на рис. 2. Причиною цього є комплекс складних фізико – хімічних і механічних процесів, і визначаються, як дегідратаційна самоорганізація [5].

Кінетичні характеристики рідини, що висихає на підкладці відображає морфологічний стан того об'єкта, до складу якого вона належить. Наприклад, якщо проаналізувати біологічну рідину людського організму, то інтерпретація отриманих результатів дозволяє використовувати з'ясований феномен як додатковий критерій не лише у функціональній електроніці [3], але й біолого-медичній діагностиці [6] і, особливо важливо, криміналістиці.

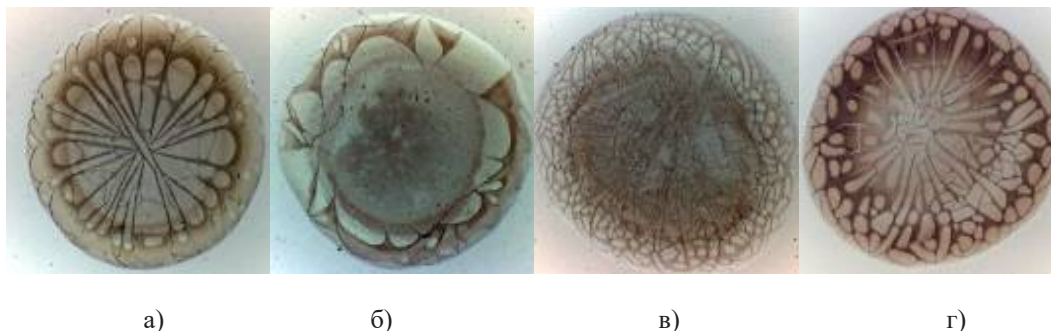


Рис. 1. Висушені краплі сироватки крові; збільшення у 28 раз:
а) практично здорова людина; б), в), г) люди з різним видами захворювань

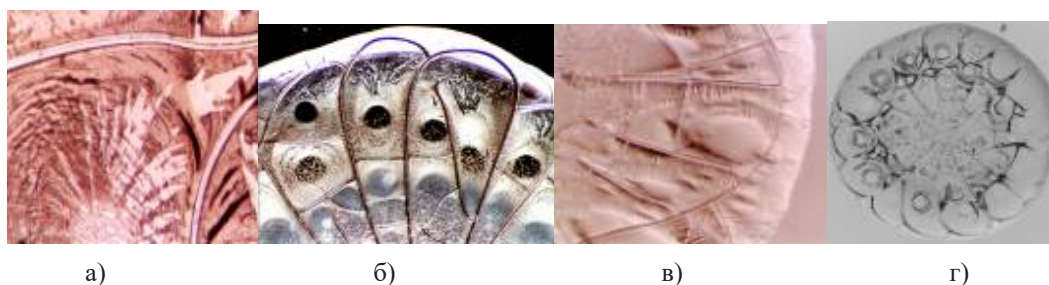


Рис. 2. Висушені краплі сироватки крові пацієнтів з різними захворюваннями. Різні структури [4]: а) язички; б) осередки і ядра; в) бляшки і зморшки; г) спіральні тріщини

За результатами дослідження етапів нелінійних процесів, що відбуваються у таких системах із залученням методів матеріалознавства [3, 7], важливо виділити і розглянути механізми, що є визначальними і мають особливості нелінійних процесів на кожному з етапів просторово-часового структуроутворення у багатокомпонентній рідині, такої, як сироватка крові.

Отримані нами результати, дозволяють зазначити наступне. Багатоетапний процес висихання краплі сироватки крові на жорсткій підкладці відбувається в дві стадії: 1) випаровування вільної води, що триває 20-35 хвилин (для крапель об'ємом 3-5 мл); 2) подальший процес випаровування води, яке триває 2-3 діб; 3) випаровування води супроводжується наростанням деформацій і утворенням додаткових тріщин, що формують остаточний морфологічний вигляд плівки, що висихає придатний для мікроскопічних досліджень.

Серед механізмів, що є відповідальними за формування морфологічних особливостей крапель як на першій (рідкій), так і на другій (твердій) стадіях висихання можна виділити такі, що відповідають за: а) взаємодію краплі з підкладкою; б) розподіл компонентів у краплі, що мають різну поверхневу активність; в) фазові переходи у краплі. На початку висихання краплі рідини на твердій підкладці відбувається винесення колоїдної фази на периферію, співвідношення компонентів в рідкій (внутрішній) частині краплі міняється. У результаті випару води зростає іонна сила розчину, а об'ємна доля колоїдної фази знижується за рахунок винесення на периферію. Сили тяжіння між частками зростають за рахунок зменшення радіуса Дебая і підвищення щільності поверхневих зарядів. Радіус взаємодії частинок зменшується. Колоїдна фаза поступово втрачає оболонки гідратів, заряд молекул наближається до ізоелектричної точки, і розчин перетворюється у метастабільний стан, за яким йде коагуляція, що ілюструє рис.3. Колоїдні частинки можуть утворювати різні структури – від колоїдного скла, при дуже високій об'ємній долі колоїду і слабкій силі взаємодії між частками – до колоїдних гелів, при дуже малій об'ємній долі колоїду і великою силою тяжіння між частинками.

Перш ніж утворюється гель, колоїдні частинки формують *фрактальні кластери*, що згодом об'єднуються в просторові грати – *гель*. Будь-яке відхилення від фрактального зростання нанокластерів (детальний аналіз таких систем проведений одним з авторів, див. монографію [3]) призводить до порушення гелеутворення. Враховуючи існуючий взаємозв'язок між концентрацією солі і значенням рН в розчинах білків, слід чекати, що зрушення ізоелектричної точки альбуміну при його навантаженні спричиняє зміну кінетики коагуляції, що ілюструє рис. 3.

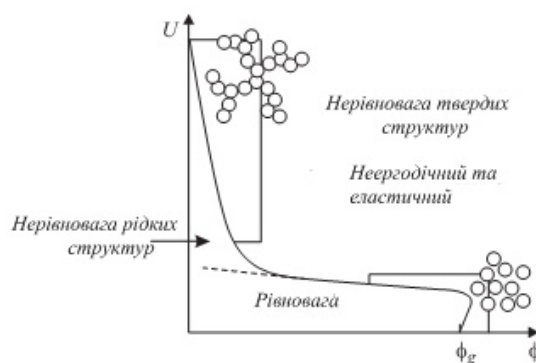


Рис. 3. Діаграма стану колоїдних часток з ближнім потенціалом взаємодії. U – сила взаємодії між частками, Φ – об'єм колоїдної фази. Суцільна лінія означає межу існування неупорядкованих твердо фазних структур, пунктир – межу між рівноважними і нерівноважними станами. Виділена ділянка зверху-ліворуч (при малій об'ємній фазі і сильним потенціалом взаємодії між частками) означає область формування гелю. Виділену ділянку внизу-праворуч (при великому об'ємі колоїдної фази і слабким потенціалом взаємодії) означає область склування

Методика аналізу кінетичної самоорганізації рідини. Процес самоорганізації рідини, що висихає, дозволяє здійснити технічну можливість реєстрації динаміки цього процесу. Ці процеси можуть бути з'єднані. Виходячи з цього нами запропоновано технологію, що відкриває нові перспективи для дослідження рідких середовищ, зокрема сироватки крові, а також для розвитку ряду практичних застосувань на її основі у криміналістиці.

Розглянемо спосіб аналізу багатокомпонентних рідин на основі сенсорного пристрою.

Головна особливість цього методу полягає в отриманні електронних підписів рідин (сироватки крові), придатних для їх ідентифікації, сертифікації та паспортизації. Інформативну основу методу складає динаміка складних процесів самоорганізації крапель, що висихають, критична до складу і структури рідини. Реєстрація цієї динаміки у вигляді акустично – механічного імпедансу (АМІ) дозволяє отримати кількісні відмінності між порівнюваними рідинами, що може бути використано для контролю їх якості шляхом порівняння з еталоном.

Для проведення аналізу самоорганізації крапель рідини, був запропонований резонатор у вигляді кварцової пластини $\text{хус}/1^{\circ}30'$ зрізу розміром 48,0-4,5-1,2 (мм).

Схема пристрою і мода коливань резонатора представлені на рис. 4. Резонатор здійснює попероздовжні коливання типу стискання-розширення.

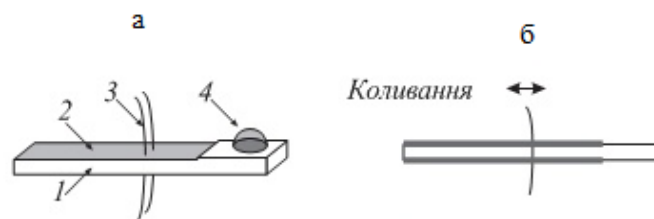


Рис. 4. Пристрій коливання кварцового резонатора. а – резонатор з краплею досліджуваної рідини, 1 – кварцова пластинка, 2 – металеве напильня, 3 – підтримувальні провідники, 4 – крапля досліджуваної рідини, б – розподіл амплітуди попероздовжніх коливань

В процесі вимірювання робочої частоти коливань кварцової пластини примусово підтримується постійною і рівною резонансній частоті ненавантаженого резонатора – 60 кГц. Амплітуда коливань ненавантаженого резонатора синусоїдально розподілена по довжині пластини. Крапля досліджуваної рідини поміщається поблизу кінця пластини. Оцінки показали, що розподіл амплітуди коливань по довжині пластини практично не змінюється при взаємодії поверхні резонатора з об'єктом (краплею). Іншими словами, крапля, що висихає, не вносить похибок до розподілу коливальної швидкості по довжині резонатора. Вимірюваною величиною є комплексна електрична провідність резонатора, навантаженого краплею, при цьому власна ємність резонатора і ємність сполучного кабелю віднімаються мостовою схемою пристрою. Значення АМІ краплі рідини (сироватки крові) обчислюються з вимірюваної величини електричної провідності і виводяться на екран в режимі реального часу. На етапі еволюції краплі величина модуля АМІ вимірюється, відображується і записується.

АМІ є величиною акустичного або механічного імпедансу об'єкту, що навантажує кварц в режимі зрешувальних коливань. В нашому випадку досліджується такий специфічний об'єкт, як крапля рідини (сироватка крові), що висихає на поверхні кварцу (підкладці). Тому можна вважати, що АМІ (А) інтегрально включає такі фізичні характеристики об'єкту, як в'язкість, еластичність, тертя і масу з різною мірою адгезії до підкладки за допомогою співвідношення:

$$A = C_1(1 + i)S + 2\pi f \eta \rho + C_2 \cdot 2\pi f m + C_3 \cdot \frac{k}{i \cdot 2\pi f} + C_4 k_T \quad (1)$$

де i – уявна одиниця; S – площа контакту рідини з кварцом; f – частота коливань кварцу; η, ρ – в'язкість та густина рідини на початковому етапі, відповідно; m, k – маса та еластичність рідини, відповідно; k_m – коефіцієнт тертя рідини о поверхню підкладки.

Перший доданок у формулі (1) описує величину акустичного імпедансу в'язкої рідини, дотичної до підкладки на площі S ; другий – значення механічного імпедансу масою m , що коливається разом з підкладкою; третій – величину акустичного або механічного імпедансу навантаження у вигляді пружного (еластичного) елемента; четвертий – значення акустичного або механічного імпедансу дисипативних втрат (тертя).

Кожен доданок має свій ваговий коефіцієнт, що позначається літерою C_i . Ці коефіцієнти на початковому етапі мають різні значення щодо різних рідин і в процесі висихання змінюються по-різному, у залежності від властивостей рідини, її складу та структури. Саме це вносить конкретні фізико-хімічні характеристики рідини, що і сприяє динаміці АМІ.

На початку процесу, доки відсоток води у рідині є високим, АМІ є пропорційним до характеристичного опору в'язкої хвилі, що дозволяє записати рівняння:

$$A_0 = C_1(1 + i)S + 2 \cdot \pi f \eta \rho \quad (2)$$

де A_0 – значення АМІ на початку процесу висихання рідини.

Для досліджуваних рідин були вибрані значення $\eta \sim 10^{-2}$ Па і $\rho \sim 10^3$ кг/м³. За цих умов висота рідини на підкладці не впливала на величину АМІ, оскільки при вибраній частоті глибина проникнення в'язкої хвилі мала порядок 10μ . Тому на початку процесу висихання можна вважати, що у формулі (1) коефіцієнт $C_1 = 1$, а інші вагові коефіцієнти дорівнюють нулю: $C_2 = C_3 = C_4 = 0$.

Наприкінці процесу висихання рідини на поверхні резонатора залишається гелеподібний, або, навіть, тверdotільний залишок. Резонатор при цьому навантажується імпедансом маси m_{end} залишку. Що аналітично можна описати співвідношенням:

$$A_{end} = H_2 f \cdot 2\pi f m_{end} \quad (3)$$

де A_{end} – значення АМІ наприкінці процесу висихання; m_{end} – маса сухого залишку. Отже закінчення процесу висихання дозволяє вважати, що ваговий коефіцієнт $C_2 = 1$, а інші вагові коефіцієнти дорівнюють нулю: $C_1 = C_3 = C_4 = 0$.

Відповідність АМІ виразам (2) і (3) на початку та наприкінці процесу висихання рідини було експериментально проведено завдяки вимірюванням дійсної та уявної частин електричної провідності резонатора (або ж за результатами вимірювань дійсної і уявної частин АМІ).

Результати вимірювань довели, що початкове і кінцеве значення АМІ, як правило, можна описувати виразами (2) і (3). Проте такі прості ситуації, як «рідкий зразок на початку» і «твердий залишок наприкінці», мають місце не завжди. Наприклад, на початку висихання деякі рідини мають АМІ з нерівними дійсною та уявною частинами (на відміну від ситуації, що описує формула (2)). Або ж наприкінці висихання рідини мають АМІ з ненульовою дійсною частиною (на відміну від аналітичного співвідношення (3)). Тому, ми вважаємо, що вирішальним чинником при використанні виміру АМІ в режимі зрушальних коливань являється надзвичайна чутливість його величини до виникнення і зростання нової фази на межі рідина-кварц, а також до акустичних і механічних властивостей (наприклад, еластичності) структур (тверdotільних або гелійових залишків), що утворюються.

Структурний аналіз рідини на сенсори. Кінетика рідини, що висихає на твердій змочуваній підкладці, є природною моделлю системи, що організовується сама, з нескінченно великою різноманітністю варіантів течії процесів, залежно від складу і структури рідини. Процес висихання визначається початковими параметрами розчину: поверхневим натягом, змочуванням, в'язкістю, внутрішньою структурою, дисперсністю, теплопровідністю, іонною силою, рН. Ці чинники впливають на такі процеси, як агрегація, преципітація, седиментація, гелеутворення і кристалізація, супроводжуючі процес висихання багатокомпонентної рідини [4]. В результаті змінюються фізичні властивості рідини, динаміка яких отримує відображення у вигляді кривої в координатах АМІ–час. Наші дослідження показали, що форма кривої АМІ є паспортною характеристикою досліджуваної рідини, такої важливою компонентою в криміналістиці, якою є сироватка крові.

Важливим, чітко контрольованим параметром рідини в нашій технології є її об'єм. Саме цей параметр порівнюваних між собою рідин має бути однаковим.

Рідина розміщується за допомогою мікроскопічного дозатора і кронштейнів, що направляють його, в певне місце кварцової пластини, з невеликої висоти, що виключає розбризкування. Площа розтікання не лімітується, оскільки вона відбиває міру змочування підкладки і є однією з важливих характеристик рідини. Тому однакова якість поверхні сенсора є критичною для цієї технології. Перед початком і після закінчення виміру поверхня сенсора послідовно обробляється водою та ізопропиловим спиртом, після чого ретельно просушується.

Така процедура обробки поверхні кварцу дозволяє отримувати добре відтворні результати при повторних вимірюваннях однієї й тієї ж рідини. Отже, параметром, що забезпечує інформативність запропонованої технології – є змочування поверхні сенсора. При однаковому об'ємі зразків порівнюваних рідин і різної міри змочування краплі цих рідин матимуть різну форму: одна – плоскішу, з більшою площею основи, інша – більш опуклою, тобто з меншою площею основи. Це неодмінно забезпечить відмінність як у початковій величині сигналу (2), так і в динаміці структуризації рідини у процесі висихання.

Іншим важливим параметром, що впливає на динаміку АМІ, є фізичні властивості адсорбційних шарів. Експериментально було доведено, що в багатокомпонентній рідині відбувається перерозподіл компонент рідкої фази відповідно до їхньої поверхневої активності. Концентрація і якісний склад поверхнево-активних речовин (ПАР), що формують адсорбційний шар на межі з повітрям, визначають механічні властивості рідини – еластичність і густину, лімітуючи випари води різною мірою, а отже, її структуризацію. ПАР знижує також поверхневий натяг на границі рідина – підкладка і знижує швидкість утворення гелю в колоїдній фазі внаслідок утворення структурно – механічного бар'єру. Саме це забезпечує виникнення тиску при утворенні нанокластерів крові. Ці процеси здійснюють свій внесок у динаміку сигналу АМІ, оскільки розмір нанокластерів суттєво впливає на еволюцію структуроутворення у рідині, що висихає. Процеси самоорганізації у краплях, що висихають, багатокомпонентних рідин, що відображуються сигналом АМІ, повністю зворотні і добре відтворюються.

Далі наведемо результати практичного застосування описаної методики. Але зазначимо, що модельний опис процесів, що відбуваються в рідині при висиханні, є все ж таки надзвичайно технологічно непростим завданням.

Результати кількісного аналізу, що можуть бути використані у криміналістиці. На рис. 5 представлені етапи висихання сироватки крові практично здорового донора і відповідні ділянки кривої АМІ, що отримана авторами роботи [4]. Ділянка кривої, що наведена праворуч виходить на насичення і зберігає його завдяки постійній масі і достатній еластичності сформованого гелю з рихлозв'язаною водою. Саме така крива має вважатися еталонною під час проведення кількісного аналізу структури рідини.

Наприклад, на рис. 6 показані типові криві АМІ сироватки крові осіб, загиблих від передозування наркотиків і алкоголю порівняно з сироваткою здорового донора. Високий вміст в крові метаболітів наркотичних речовин пригноблює утворення гелю у краплях сироватки, що висихають, що робить їх надзвичайно крихкими. Навіть невеликі коливання стискування — розтягування кварцу призводять до інтенсивного розтріскування залишків крапель і відкріплення їх фрагментів від поверхні сенсора. Це механічне навантаження, що хаотично змінюється, відображується на дисплеї у вигляді неврегульованих зигзагоподібних ліній.

Криві АМІ у осіб, загиблих від алкогольної інтоксикації відрізняються від кривих, представлених на рис. 5.

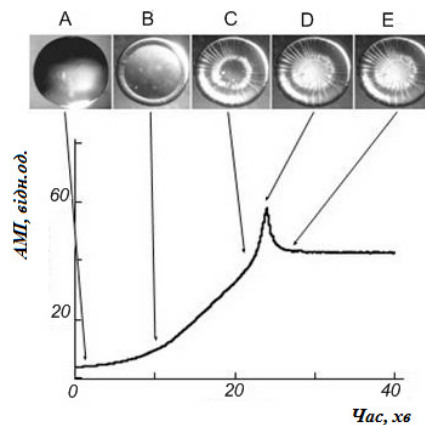


Рис. 5. Процес самоорганізації краплі сироватки крові [4]. А-Е – етапи висихання краплі сироватки крові донора (5 μ l) і відповідні до них ділянки кривої АМІ (знизу); А-В – формування білкового валика по периферії і сплюснення куполу краплі; В-С – гелеутворення; С-Д – процес кристалізації солі в матриці гелю; D-E – випар залишків вільної води і досягнення насичення сигналу АМІ. Цей рівень відображує зв'язок маси краплі з рихлопов'язаною водою і сили адгезії осаду до поверхні кварцу

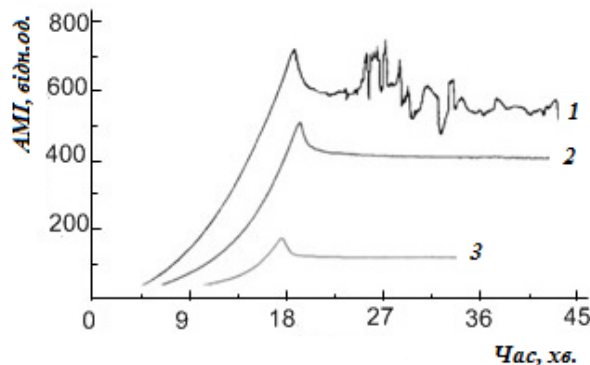


Рис. 6. Динаміка АМІ крапель, що висихають, сироватки крові особи, загиблої від передозування наркотиків (1); практично здорового донора (2); особи, загиблої від алкогольної інтоксикації (3)

Таким чином, досліджування кінетики рідини, що висихає на поверхні кварцового резонатора, що коливається, завдяки контрольованим фізико-хімічним параметрам, що інтегрально впливають на форму кривої АМІ, надає інформацію про рідину, що є достатньою для її ідентифікації.

Отже, запропонована нами методика ресстрації дії на рідині ряду фізичних чинників (магнітного поля УФ-випромінювання, запахів, рентгенівського випромінювання) відкриває можливість контролювати якість вин, соків, молока та інших рідин.

Між іншим, описана нами ідентифікаційна технологія може стати зручним інструментом для виявлення фальсифікованих лікарських засобів експрес-методом, а також для одно-моментного визначення Ratio – відношення концентрації розчинних сухих речовин до кислотності – основного показника якості соків, використовуваної в експертних лабораторіях.

Висновки та перспективи. Результати досліджень, що описані у цій статті систематизуються у такий спосіб:

- проаналізовано метод кварцового зважування;
- проведено ідентифікацію структури сироватки крові;
- визначена топологія багато-компонентної рідини;
- проаналізовано фізико-хімічні властивості рідини.

Вирішені нами задачі дозволили визначити *морфологію* матеріалу рідини, а таким чином і багато-компонентної речовини. Використаний спосіб аналізу морфології багатокомпонентних рідини ґрунтується на використанні сенсорного пристрою, характерною рисою якого є отримання електронних підписів рідин, придатних для їх ідентифікації та паспортизації. Інформативну основу запропонованого нами методу складає динаміка складних процесів самоорганізації крапель, що висихають, що є критичною до складу і структури рідини. Реєстрація цієї динаміки і вираження її у вигляді кривих АМІ дозволяє отримувати кількісні відмінності між порівнюваними рідинами, що може бути використано для контролю їх якості шляхом порівняння з еталоном.

Слід зауважити, що структурна еволюція крапель, що висихають, біологічних рідин є складним багатостадійним процесом, в якому умовно можна виділити дві стадії: події, що відбуваються під час випарювання вільної води, і структуроутворення, що пов'язане з випаром води. Етапами структурного утворення першої стадії є: взаємодія рідини з підкладкою – за умови змочування, утворення лінії прикріплення до субстрату і розвиток відцентрової течії капілярної природи; утворення склоподібного шару на периферії краплі; розподіл розчинених компонентів у відповідності з їх поверхневими властивостями і утворення адсорбційних шарів по межах розділу фаз; каскад фазових переходів; кристалізація солі в матриці гелю.

Список використаних джерел:

1. Ковальчук В.В. Нанометрологія та властивості нанокластерів. Метрологія та прилади. 2010, С. 54-56
2. Ковальчук В.В. Кластерная модификация полупроводниковых гетероструктур (монографія). Наукове видання. Одеса: «ТЕС», 2023, 297 с.
3. Ковальчук В.В. Електронні процеси в наноструктурах з субфазним кремнієм / за ред. В.В. Ковальчук, В.А. Дроздов, Журнал фізичних досліджень №4, 2003, С. 25-32
4. Яхно Т. Нова технологія дослідження багатокомпонентних рідин за допомогою кварцового резонатора. Теоретичне обґрунтування та застосування /за ред. Санін А.Г., Саніна О.А., Казаков В.В., Яхно В.Г. / Журнал технічної фізики. 2009, том. 79 (10), С. 22 – 29
5. Рапіс І.Г. Утворення впорядкованої структури під час сушіння білкової плівки. Листи в журналі технічної фізики. 1988, том. 14 (17). С. 1560-1562
6. Тарасевич Ю. Механізми та моделі дегідратаційної самоорганізації біологічних рідин. Журнал прогресу фізичних наук. 2004, том 174 (7), С. 779-781.
7. Ковальчук В. Чутливий елемент інтелектуального датчика / за ред. В. Ковальчук, К. Мамука., М. Сморг / Журнал фізики та електроніки. 2022, том. 30(2), С. 67-74.