

*Степанов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра физики, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина.*

*Далека Василь Хомич, доктор технических наук, профессор, кафедра электричного транспорту, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Україна.*

*Бондаренко Александр Юрійович, кандидат технических наук, старший науковий співробітник, доцент, кафедра інженерної електрофізики, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.*

*Степанов Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, кафедра физики, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Украина.*

*Daleka Vasyly, Kharkiv National University Municipal Economy named after A. M. Beketov, Ukraine.*

*Bondarenko Alexander, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine.*

*Stepanov Alexander, Kharkiv National Automobile and Highway University, Ukraine*

УДК 537.523.9

**Білінський Й. Й.,  
Павлюк О. А.,  
Юкиш С. В.**

## ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ РІДИННОФАЗНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ ГАЗОРОЗРЯДНІЙ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

Запропоновано метод визначення малих концентрацій загальної мінералізації рідиннофазного об'єкта шляхом отримання спектрів випромінювання при газорозрядній візуалізації. Розроблено експериментальну установку для дослідження спектрів, в якій одночасно досліджуються два рідиннофазні об'єкти. Отримано спектри випромінювання розчинів солей NaCl, MgSO<sub>4</sub>, KCl, CaCl<sub>2</sub>, FeSO<sub>4</sub>, виявлено характерні спектральні лінії для них.

**Ключові слова:** газорозрядна візуалізація, рідиннофазний об'єкт, спектр випромінювання, лінійчатий спектр, характерна спектральна лінія.

### 1. Вступ

В Україні існує проблема експрес-контролю домішок у воді (рідиннофазному об'єкті (РФО)), зокрема мінералізації в системах централізованого питного постачання. Існуючі методи дослідження РФО базуються на хімічному аналізі, фото та колориметрії, гравіметрії, спектроскопії, кондуктометрії. Для визначення загальної мінералізації найчастіше використовуються методи, що базуються на вимірюванні електроопору, але це не дозволяє з достатньою точністю визначати малі значення загальної мінералізації РФО, інші методи хоч і дозволяють отримати вищу точність, потребують більших витрат часу або дорогого обладнання [1–3]. Таким чином, існує необхідність у створенні методу, який дозволить підвищити точність визначення загальної мінералізації при малих витратах часу та за допомогою недорогого обладнання.

### 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Одним з перспективних методів аналізу РФО є газорозрядна візуалізація (ГРВ) — це плазмове світіння на поверхні предметів, до яких прикладена змінна напруга з частотою у межах 10–100 кГц та напругою у межах 3–30 кВ [4]. Цей метод не потребує попередньої підготовки РФО та є практично миттєвим. При ГРВ до досліджуваного об'єкта прикладається високовольтна, високочастотна напруга, що призводить до загорання навколо об'єкта газового розряду. Розряд являє собою слабоіонізовану плазму, в якій крім хімічних елементів

та речовин, що присутні в атмосфері, знаходяться хімічні елементи та речовини, з яких складається РФО. Кожен хімічний елемент та речовина мають свій неповторний спектр випромінювання, який формується фотонами, що виникають при поверненні електронів з вищих орбіталей на нижчі (при ГРВ електрони у нейтральних атомів та їх іонів переходять на вищі рівні в основному за рахунок зіткнень з електронами, розігнаними прикладеним електричним полем), тому проаналізувавши спектр випромінювання плазми можливо встановити її хімічний склад [5].

Якщо РФО складається з  $n$  хімічних елементів та речовин, то спектр РФО можливо описати за формулою:

$$\sum_{m=1}^n I_{mk} = \sum_{m=1}^n N_{mk} (A_{mki} (E_{mk} - E_{mi})), \quad (1)$$

де  $I_{mk}$  — інтенсивність  $k$ -ї спектральної лінії для  $m$ -ї речовини або сполуки;  $N_{mk}$  — заселеність рівнів для  $m$ -ї речовини або сполуки;  $A_{mki}$  — ймовірність переходу з верхнього рівня  $k$  на нижній  $i$  для  $m$ -ї речовини або сполуки;  $E_{mk}$  та  $E_{mi}$  — енергія рівня  $k$  та  $i$  для  $m$ -ї речовини або сполуки.

По ширині спектральної лінії  $\Delta\nu$  можна точно визначити концентрацію речовини  $N_0$  в одиниці об'єму:

$$N_0 = \frac{\Delta\nu}{2\sigma^2} \sqrt{\frac{\pi\mu}{RT}}, \quad (2)$$

де  $\mu$  — молярна атомна маса;  $\sigma$  — ефективний радіус атома;  $R$  — газова стала;  $T$  — температура [6, 7].

Інтенсивність спектральних ліній  $I$  елемента пов'язана з його концентрацією  $C$  в пробі рівнянням Ломакіна-Шайбе:

$$I = aC^b, \quad (3)$$

де  $a$  та  $b$  константи, що знаходяться дослідним шляхом.

Інтенсивність спектральних ліній залежить не тільки від вмісту елемента в пробі, але і від умов збудження. Тому кількісні значення концентрацій складових РФО проводять з використанням відносних, а не абсолютних інтенсивностей, як правило, характерних спектральних ліній. Під відносною інтенсивністю лінії розуміють відношення її інтенсивності до інтенсивності іншої спектральної лінії, що називається лінією порівняння.

Якщо інтенсивність спектральної лінії  $I_1$  для певної складової відомої концентрації  $C_1$ , то невідомої її концентрації  $C_2$  можна визначити, використовуючи інтенсивність  $I_2$  такої ж спектральної лінії за формулою:

$$C_2 = C_1 \sqrt[2]{\frac{I_2}{I_1}}. \quad (4)$$

Залежно від стану речовини використовуються спектри поглинання або випромінювання. Переважно для дослідження РФО використовуються спектри поглинання, оскільки при переведенні рідини у збуджений стан велика частина залишається у нормальному стані і розсіює та поглинає генероване випромінювання, що є наслідком неоднозначності та великої похибки при вимірюванні. Існує кілька основних способів переведення атомів у стан збудження для проведення спектрального аналізу, з яких найбільше значення мають електрична дуга та іскра, полум'я, генерована електричним полем плазма в газі-носії [8]. Для підвищення точності вимірювання і достовірності в роботі запропоновано метод методу визначення малих концентрацій загальної мінералізації РФО шляхом отримання спектрів випромінювання при ГРВ.

Таким чином, метою проведених досліджень є перевірка можливості використання запропонованого методу визначення малих концентрацій загальної мінералізації РФО шляхом отримання спектрів випромінювання при ГРВ.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні основні задачі:

1. Розробити методику до запропонованого методу.
2. Розробити експериментальну установку відповідно до розробленої методики.
3. Провести серію експериментів на установці з водорозчинними солями та отримати характерні спектральні лінії для кожного розчину.
4. Перевірити отримані характерні спектральні лінії з результатами попередніх досліджень спектрів атомів, що входять до розчинів.
5. Перевірити можливість визначення присутності кількох солей в одному РФО.

### 3. Результати досліджень розчинів солей за допомогою газорозрядної візуалізації

Відповідно до запропонованого методу розроблено методику визначення загальної мінералізації досліджуваного РФО за рахунок порівняння його спектру зі

спектром еталонного РФО отриманих при ГРВ, яка включає:

1. Отримання спектру випромінювання еталонного РФО.
2. Додавання до еталонного РФО певної кількості хімічного елемента, або сполуки, що планується виявити в досліджуваному РФО, та отримання його спектру випромінювання.
3. Повторення пункту 2 для всіх хімічних елементів та сполук, що планується виявити в досліджуваному РФО.
4. Порівняння отриманих спектрів між собою та зі спектром еталонного РФО.
5. Додавання у еталонний РФО кількох хімічних елементів, або сполук, що були досліджені в пункті 2, та отримання спектру випромінювання від отриманого РФО.
6. Порівняння отриманого спектру зі спектрами отриманими у пункті 2.

Запропонована методика передбачає створення експериментальної установки для дослідження спектрів, в якій одночасно досліджуються два РФО [9]. Це дозволило отримати світіння РФО при ГРВ за однакових зовнішніх факторів (температура, вологість, тиск та склад атмосфери) та внутрішніх факторів установки (прикладена напруга, частота). Схему розробленої установки показано на рис. 1, яка складається з комірок 1 та 2 для розміщення досліджуваного та еталонного РФО, електродів штирів 3, що опускаються в РФО, діелектричної пластинки 4 між РФО та плоским електродом 5, корпусу 6, що забезпечує затемнення, рухомого блоку 7, який дозволяє встановити фотоелектронний помножувач (ФЕП) 10 над досліджуваним, або еталонним РФО, вставки для встановлення світوفільтрів 9, генератора високовольтної високочастотної напруги 8, блоку індикації результатів вимірювання 11.

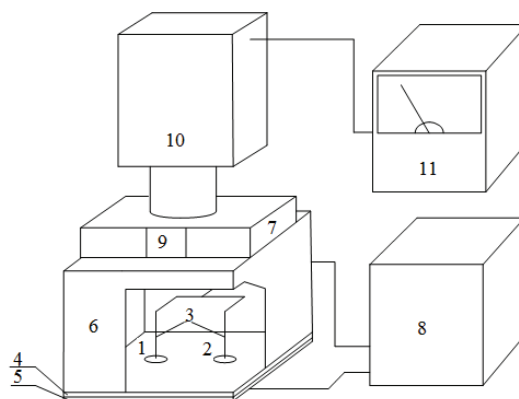
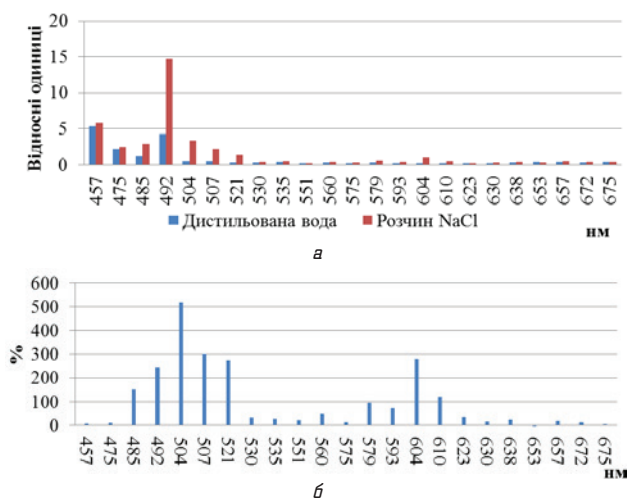


Рис. 1. Експериментальна установка для ГРВ з двома комітками, що дозволяє одночасно здійснити вплив напругою на досліджуваний та еталонний РФО

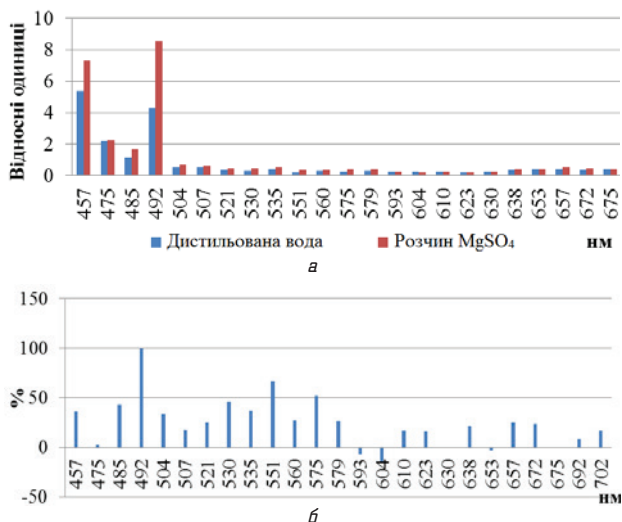
Спектри випромінювання еталонного і досліджуваного РФО отримані в такій послідовності: розміщувалися однакові кількості досліджуваного та еталонного РФО у комітках експериментальної установки; встановлювався фотометр над досліджуваним РФО та встановлювався світوفільтр; здійснювався 5-ти секунндний вплив 3 кВ напруги з частотою 50 кГц, під час якого фіксувалась інтенсивність випромінювання досліджуваного РФО; таким самим чином отримувалась інтенсивність для

еталонного РФО; повторювались попередні кроки для 23 вузькосмугових світлофільтрів (ширина пропускання 10 нм), що рівномірно охоплювали діапазон 457–675 нм, таким чином формувался лінійчатий спектр РФО. Для проведення експериментів використовувались розчини солей NaCl, MgSO<sub>4</sub>, KCl, CaCl<sub>2</sub>, FeSO<sub>4</sub>, в якості зразкових РФО використана дистильована вода.

Використання запропонованої методики та експериментальної уставки дозволило отримати спектри випромінювання для досліджуваних і зразкових РФО, які представлені на рис. 2–6, а, а також відносні спектральні лінії. На рис. 2–6, б представлені відносні спектральні лінії досліджуваних РФО.



**Рис. 2.** Результати експериментів з розчином NaCl:  
а — спектр випромінювання розчину NaCl та дистильованої води;  
б — спектр відносних спектральних ліній розчину NaCl

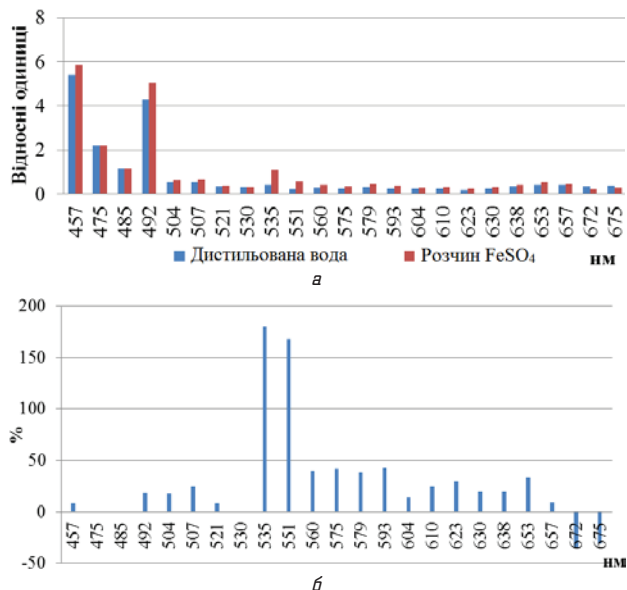


**Рис. 3.** Результати експериментів з розчином MgSO<sub>4</sub>:  
а — спектр випромінювання розчину MgSO<sub>4</sub> та дистильованої води;  
б — спектр відносних спектральних ліній розчину MgSO<sub>4</sub>

На спектрі відносних спектральних ліній розчину NaCl (рис. 2, б) присутні піки на довжинах 485 нм, 492 нм, 504 нм, 507 нм, 521 нм та 604 нм. Піки на довжинах 485 нм, 492 нм, 504 нм, 507 нм, 521 нм можуть бути пояснені присутністю іонів хлору Cl у РФО, оскільки ці довжини є близькими для характерних спектральних ліній хлору. Натрій має характерну спект-

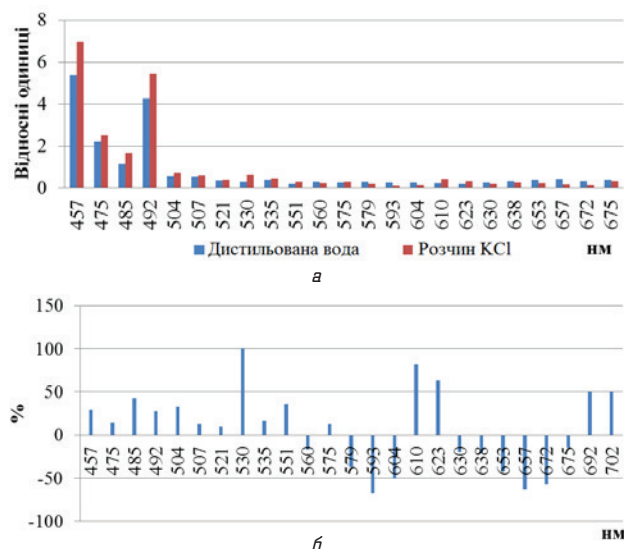
ральну лінію на довжині 589 нм, оскільки світлофільтр з такою довжиною хвилі відсутній в експериментальній установці, то ця лінія спостерігалася на довжині 604 нм.

На спектрі відносних спектральних ліній розчину MgSO<sub>4</sub> (рис. 3, б) присутні піки на довжинах 492 нм, 530 нм, 551 нм та 575 нм. Піки на довжинах 530 нм та 551 нм можуть пояснюватися присутністю іонів магнію Mg<sup>2+</sup> у РФО.



**Рис. 4.** Результати експериментів з розчином FeSO<sub>4</sub>:  
а — спектр випромінювання розчину FeSO<sub>4</sub> та дистильованої води;  
б — спектр відносних спектральних ліній розчину MgSO<sub>4</sub>

На спектрі відносних спектральних ліній розчину FeSO<sub>4</sub> (рис. 4, б) присутні піки на довжинах 535 нм, 551 нм та 653 нм. Вони можуть бути пояснені присутністю іонів заліза Fe<sup>3+</sup> у РФО.



**Рис. 5.** Результати експериментів з розчином KCl:  
а — спектр випромінювання розчину KCl та дистильованої води;  
б — спектр відносних спектральних ліній розчину KCl

Експериментальні дані для KCl (рис. 5, б) не дали епіків, які б могли вказати на присутність іонів калію K<sup>+</sup>

у РФО, це пов'язано з тим, що калій не має інтенсивних спектральних ліній для досліджуваного спектрального діапазону. Пік на довжині хвилі 530 нм можна пов'язати з присутністю іонів хлору  $\text{Cl}^-$  у РФО.

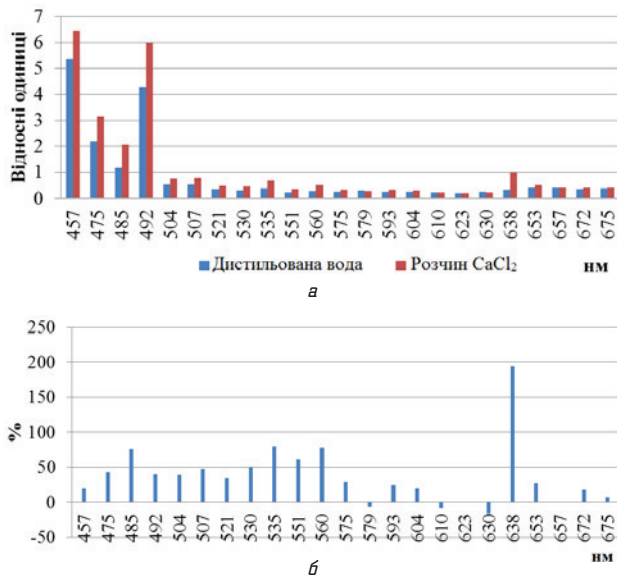


Рис. 6. Результати експериментів з розчином  $\text{CaCl}_2$ :

*a* — спектр випромінювання розчину  $\text{CaCl}_2$  та дистильованої води;  
*б* — спектр відносних спектральних ліній розчину  $\text{CaCl}_2$

Експериментальні дані для  $\text{CaCl}_2$  (рис. 6, б) мають пік на довжині хвилі 638 нм, який можна пояснити присутністю іонів кальцію  $\text{Ca}^{2+}$  у РФО.

З бібліотеки NIST Atomic Spectra Database Lines Data [10] отримано, що для спектрального діапазону 457–675 нм, характерні спектральні лінії для Fe мають довжини хвиль 495,75 нм, 516,75 нм, 522,72 нм, 596,95 нм, 532,80 нм, 537,15 нм, 639,36 нм, 649,5 нм, для Na — 588,995 нм, 589,592 нм, для Cl — 479,455 нм, 489,677 нм, 490,478 нм, 521,794 нм, 542,325 нм, для K — 494,2 нм, 693,88 нм, для Mg — 470,30 нм, 516,73 нм, 517,26 нм, 518,36 нм, 552,84 нм, 571,1 нм, 625,68 нм, для H — 656 нм і 486 нм, для O — 490 нм, для S — 628 нм і 630 нм. Ці дані збігаються з отриманими експериментальними результатами.

Проаналізувавши результати всіх експериментів можна стверджувати, що максимальні абсолютні інтенсивності, що припадають на довжині хвиль 457 нм, 492 нм та 485 нм належать атомам кисню і водню. Вони є максимальними, так як води у всіх зразках найбільше.

Для перевірки селективності запропонованого методу проведено дослід з сумішшю двох солей  $\text{CaCl}_2$  та  $\text{FeSO}_4$ . В попередніх дослідях було виявлено, що в іоні спектра  $\text{Fe}^{3+}$  присутній пік на довжині хвилі 535 нм, а іони  $\text{Ca}^{2+}$  на 638 нм, припущено, що ці два піки будуть спостерігатись на спектрі відносних спектральних ліній для суміші цих двох солей. Отримані спектри випромінювання для розчину солей  $\text{CaCl}_2$  та  $\text{FeSO}_4$  і дистильованої води представлено на рис. 7, *a*. На рис. 7, *б* представлено відносні спектральні лінії розчину солей  $\text{CaCl}_2$  та  $\text{FeSO}_4$ .

Як видно з рис. 7, *б* піки присутні на довжинах хвиль 535 нм та 638 нм, що відповідає результатам досліджень наведених вище.

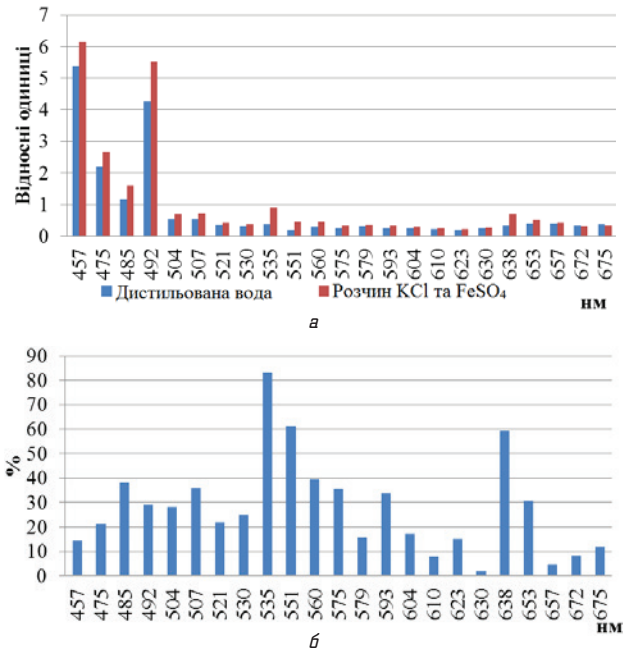


Рис. 7. Результати експериментів з розчином  $\text{CaCl}_2$  та  $\text{FeSO}_4$ :

*a* — спектр випромінювання розчину  $\text{CaCl}_2$  та  $\text{FeSO}_4$  і дистильованої води;  
*б* — спектр відносних спектральних ліній розчину  $\text{CaCl}_2$  та  $\text{FeSO}_4$

Результати експериментів дозволяють стверджувати про можливість виявлення за допомогою запропонованого методу іонів  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  у РФО.

#### 4. Висновки

1. Розроблено методику визначення малих концентрацій загальної мінералізації РФО шляхом отримання спектрів випромінювання при ГРВ.
2. Розроблено експериментальну установку для визначення малих концентрацій загальної мінералізації РФО шляхом отримання спектрів випромінювання при ГРВ.
3. Проведено серію експериментів з водорозчинними солями NaCl,  $\text{MgSO}_4$ , KCl,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{FeSO}_4$ .
4. Встановлено, що для іонів  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  спостерігається підвищення інтенсивності спектральних ліній на довжинах хвиль близьких до довжин хвиль характерних спектральних ліній цих елементів.
4. Підтверджена можливість визначення присутності кількох солей в одному РФО.

#### Література

1. Тарабарова, С. Б. Качество питьевой воды в Украине: современное состояние, влияние на здоровье, сравнительная характеристика отечественной базы с международными стандартами [Электронный ресурс] / С. Б. Тарабарова. — Режим доступа: [www/URL: http://www.health.gov.ua/Publ/conf.nsf/0/d6b696f2be5e65d6c2256dc6004995f4](http://www.health.gov.ua/Publ/conf.nsf/0/d6b696f2be5e65d6c2256dc6004995f4). — 20.05.2014.
2. Вергун, О. М. Аналіз актуальних чинників погіршення якості питного водопостачання в контексті національної безпеки України [Електронний ресурс] / О. М. Вергун // Аналітична записка. — Режим доступу: [www/URL: http://www.niss.gov.ua/articles/1037/](http://www.niss.gov.ua/articles/1037/). — 20.05.2014.
3. Зори, А. А. Экспресс-метод определения общей минерализации питьевой воды [Текст] / А. А. Зори, В. Д. Корнев, Ю. Е. Марковский // Наукові праці ДонНТУ. — 2006. — Вип. 107. — С. 136–142.
4. Білінський, Й. Й. Дослідження характеристик ГРВ зображень рідиннофазних об'єктів [Текст] / Й. Й. Білінський, О. А. Павлюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2011. — № 5. — С. 178–183.

5. Korotkov, K. Analysis of Stimulated Electrophotonic Glow of Liquids [Electronic resource] / K. Korotkov, D. Orlov // Water. — 2010. — V. 2. — P. 29–43. — Available at: \www/URL: <http://dx.doi.org/10.14294/WATER.2010.2>. — 20.05.2014.
6. Медведев, Р. Н. Атомно-эмиссионный анализ проводящих жидкостей при диафрагменном разряде в автоколебательном режиме [Текст] / Р. Н. Медведев, И. А. Зарубин // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. — 2013. — № 1(12). — С. 166–170.
7. Frantskevich, K. V. Calibration curves in atomic emission spectral analysis of biological specimens [Text] / K. V. Frantskevich // Translated from Zhurnal Prikladnoi Spektroskopii. — 2006. — Vol. 73, № 2. — P. 250–253.
8. Суриков, В. Т. Введение образцов в индуктивно связанную плазму для спектрометрического анализа [Текст] / В. Т. Суриков, А. А. Пушывев // Аналитика и контроль. — 2006. — № 2. — С. 112–125.
9. Пристрій газорозрядної візуалізації зображення [Електронний ресурс]: патент України 71414 МПК (2012.01) G03B 41/00 / Й. Й. Білинський, О. А. Павлюк. — заявл. 9.01.2012, опубл. 10.07.2012, бюл. № 13. — Режим доступу: \www/URL: <http://uapatents.com/4-71414-pristriij-gazorozryadno-vizualizaci-zobrazhennya.html>. — 20.05.2014.
10. NIST Atomic Spectra Database Lines Data [Electronic resource]. — Available at: \www/URL: <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm>. — 20.05.2014

#### ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ЖИДКОФАЗНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Предложен метод определения малых концентраций общей минерализации жидкофазного объекта путем получения спектров излучения при газоразрядной визуализации. Разработана экспериментальная установка для исследования спектров,

в которой одновременно исследуются два жидкофазных объекта. Получены спектры излучения растворов солей NaCl, MgSO<sub>4</sub>, KCl, CaCl<sub>2</sub>, FeSO<sub>4</sub>, выявлены характерные спектральные линии для них.

**Ключевые слова:** газоразрядная визуализация, жидкофазный объект, спектр излучения, линейчатый спектр, характерная спектральная линия.

*Білинський Йосип Йосипович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет, Україна, e-mail: yosyp.bilynsky@yandex.ru.*

*Павлюк Олександр Анатолійович, асистент, аспірант, кафедра електроніки, Вінницький національний технічний університет, Україна, e-mail: pavluk\_89@i.ua.*

*Юкиш Сергій Васильович, асистент, кафедра електроніки, Вінницький національний технічний університет, e-mail: yukish@yandex.ua*

*Билинский Иосиф Иосифович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники, Винницкий национальный технический университет, Украина.*

*Павлюк Александр Анатольевич, ассистент, аспирант, кафедра электроники, Винницкий национальный технический университет, Украина.*

*Юкиш Сергей Васильевич, ассистент, кафедра электроники, Винницкий национальный технический университет, Украина.*

*Bilynskiy Yosyp, Vinnytsia National Technical University, Ukraine, e-mail: yosyp.bilynsky@yandex.ru.*

*Pavliuk Alexander, Vinnytsia National Technical University, Ukraine, e-mail: pavluk\_89@i.ua.*

*Yukish Serhiy, Vinnytsia National Technical University, Ukraine, e-mail: yukish@yandex.ua*

УДК 537.868.51

Торчук М. В.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВИДЕОИМПУЛЬСОВ В МОЛОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЕ КОРОВ

*Проведен теоретический анализ взаимодействия импульсного электрического поля с молочной железой новотельных коров. Полученные результаты позволяют исследовать распределение импульсного электрического поля в объеме молочной железы и определить параметры импульсного излучения (амплитуда импульсов; частота и период следования импульсов; величина экспозиции) для увеличения иммуноглобулинов класса LgG и LgM.*

**Ключевые слова:** молочная железа коров, импульсы электрического поля, молозиво и молоко коров, иммуноглобулины.

### 1. Введение

По данным литературных источников из-за болезней самые высокие потери телят бывают до 15-дневного возраста. По общественным данным, на первые 5 дней жизни приходится 40–50 % гибели телят, на первые 10 дней — 65–70 и до 15-дневного возраста — 75–80 % от павших в течение первого года жизни [1]. В современных условиях для лечения заболеваний новорожденных телят используют антибиотики и химические препараты, которые наносят вред организму телят, а результаты лечения не всегда оказываются эффективными. Проведенный анализ инфекционных болезней новорожденных телят показывает, что их болезни в первые

дни жизни зависят от количества иммуноглобулинов, которые попадают в организм телят через молозиво коров [2]. Важнейшая функция молозива состоит в обеспечении плавного перехода от внутриутробного развития и питания веществами, поступающими с кровью матери, к автономному питанию и развитию в условиях внешней среды.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В современных условиях для повышения иммунологической ценности молозива принимают вакцинацию коров соответствующими антигенами. Однако эта процедура